



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH PROSES COPPERIZING TERHADAP
STRUKTUR MIKRO AISI 1006 DENGAN VARIASI
TEMPERATUR *PRE-HEAT* DAN *IMMERSE TIME***

TIO ZAILINDRA
NRP. 2712100027

Dosen Pembimbing:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati Purwaningsih, S.Si, M.Si.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



FINAL PROJECT - TL141584

**EFFECT OF COPPERIZING PROCESS ON
MICROSTRUCTURE OF AISI 1006 WITH PRE-
HEAT TEMPARTURE AND IMMERSE TIME
VARIATION**

**TIO ZAILINDRA
NRP. 2712100027**

**Advisor:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati Purwaningsih, S.Si, M.Si.**

**MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**PENGARUH PROSES *COPPERIZING* TERHADAP
STRUKTUR MIKRO AISI 1006 DENGAN VARIASI
TEMPERATUR *PRE-HEAT* DAN *IMMERSE TIME***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
TIO ZAILINDRA
NRP. 2712 100 027

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sutarsis, S.T., M.Sc (Pembimbing I)
2. Haryati Purwaningsih, S.Si, M.Si (Pembimbing II)



PENGARUH PROSES *COPPERIZING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO AISI 1006 DENGAN VARIASI TEMPERATUR *PRE-HEAT* DAN *IMMERSE TIME*

Nama : Tio Zailindra
NRP : 2712100027
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Sutarsis, S.T.,M.Sc.
Co-Pembimbing : Hariyati Purwaningsih, S.Si, M.Si

ABSTRAK

Pemaduan besi dengan tembaga diketahui mampu meningkatkan kekuatan dengan diimbangi dengan keuletan. Studi ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas proses *copperizing* dibandingkan dengan metode pengecoran ataupun metalurgi serbuk dengan mengetahui presentase Cu yang mampu berdifusi, membedakan kondisi fisik Fe sebelum dan setelah *copperizing*, menganalisis pembentukan fasa dan perubahan ukuran butir akibat proses serta menganalisis pola persebaran Cu di dalamnya menggunakan variasi temperature *pre-heat* dan waktu celup. *Raw material* berupa AISI 1006 dipreparasi dengan membersihkan bagian permukaan, proses *copperizing* dimulai dilakukan melakukan *pre-heat* terhadap baja dengan variasi temperatur 800°C dan 900°C lalu dicelupkan ke dalam tembaga cair selama beberapa saat, waktu celup yang divariasikan antara lain 3 menit, 5 menit, dan 7 menit sedangkan pendinginannya dilakukan di udara. Pengujian yang dilakukan terhadap sampel meliputi: Pengamatan Makro, OES, XRD, SEM/EDX, dan pengamatan Metalografi. Berdasarkan Pengamatan makro seluruh spesimen membentuk lapisan Cu. Spesimen dengan *pre-heat* 800°C membentuk lapisan relative lebih renggang dibandingkan 900°C menghasilkan mampu mendifusikan Cu lebih baik hal tersebut juga ditunjang dari pengujian OES. Hasil XRD menunjukkan bahwa spesimen dengan *pre-heat* 800°C, Cu menghasilkan fasa tersendiri akibat komposisi yang melebihi batas kelarutannya di dalam Fe- α . Pengujian SEM/EDX membuktikan bahwa Cu terkonsentrasi pada bagian batas butir serta membentuk pola persebaran dari dari luar ke dalam. Perubahan ukuran butir juga

terlihat setelah melakukan pengamatan metalografi serta perhitungan ukuran butir dengan metode intercept, hasilnya seiring dengan penambahan Cu maka ukuran butir semakin mengecil.

Kata Kunci : *Copperizing, Pre-heat, Immerse time*, Difusi, Komposisi, Fasa, Ukuran butir.

EFFECT OF COPPERIZING PROCESS ON MICROSTRUCTURE OF AISI 1006 WITH PRE-HEAT TEMPARTURE AND IMMERSE TIME VARIATION

Name : Tio Zailindra
NRP : 2712100027
Jurusan : Materials dan Metallurgical Engineering
FTI-ITS
Advisor : Sutarsis, S.T.,M.Sc.
Co-Advisor : Hariyati Purwaningsih, S.Si, M.Si

ABSTRACT

Iron alloy with copper known to increase to offset the rise to power of tenacity. This study aims to determine the effectiveness of the copperizing process compared with the method of casting or powder metallurgy to determine the percentage of Cu were able to diffuse, distinguishing physical condition Fe before and after copperizing, analyzing the phase formation and changes in grain size due to process and analyze the pattern of distribution of Cu in it using a variation pre-heat temperature and immersion time. Raw materials such as AISI 1006 was prepared by cleaning the surface, the copperizing process begins conducted pre-heat to the steel with temperature variation of 800°C and 900°C and then dipped in molten copper for a few moments, a dye which varied between another 3 minutes, 5 minutes, and 7 minutes while cooling is done in air. Tests conducted on samples include: Observation Macro, OES, XRD, SEM / EDX, and observations Metallography. Based on the observation of macroscopic observation entire specimen form a Cu layer. Specimens with pre-heat to 800°C to form a layer of relatively more tenuous than 900°C produce Cu better able to diffuse it also supported from testing OES. XRD results showed that specimens with pre-heat to 800°C, Cu produces its own phase due to the composition exceeds the limit of solubility in Fe- α . Testing SEM / EDX prove that Cu is concentrated at the grain boundaries and form a distribution pattern from the outside to the inside. Changes in grain size was also seen after metallographic observation and calculation methods intercept grain size, the results are in line with the addition of Cu, the grain size is getting smaller.

Keywords: Copperizing, Preheat, Immerse time, Diffusion, composition, phase, grain size.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat Rahmat dan Karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas akhir ini. Penulisan laporan ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik. Judul yang penulis ajukan adalah “Pengaruh proses Copperizing terhadap struktur mikro AISI 1006 dengan *variasi pre-heat temperature* dan *Immerse time*”.

Dalam penyusunan dan penulisan Tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis berterima kasih kepada:

1. Kedua orang tua beserta keluarga yang telah memberikan doa serta dukungannya.
2. Bapak Sutarsis, S.T., M.Sc dan Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si, M.Si selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan dan pengajaran yang bermanfaat bagi penulis.
3. Bapak Mujianto, Bapak A.Chanan, Bapak Sutari dan Ibu Rusalia Istiani atas bantuan secara teknis selama penelitian berlangsung
4. Seluruh Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 yang selalu memberi semangat serta dorongan kepada penulis.
5. Seluruh pihak yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Laporan tugas Akhir ini masih belum sempurna, karenanya kritik dan saran akan penulis terima dengan senang hati. Penulis berharap laporan ini bisa berguna bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya

Surabaya, 10 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	
DAFTAR TABEL	
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Baja	5
2.1.1. Diagram fasa Fe-Fe ₃ C	6
2.2.2. Fasa	7
2.2.3. Struktur	7
2.3. <i>High Strength Low Alloy</i>	9
2.3.2. <i>Weathering Steels</i>	10
2.4. Difusi	12
2.4.2. Difusi pada Solid	13
2.4.3. <i>Hole Theory</i>	15
2.5. Diagram Fasa Fe-Cu	16
2.6. Penelitian Sebelumnya	17
2.6.1. Efek penambahan Cu terhadap kekuatan tarik dan <i>grain refinement</i> baja	17
2.6.2. Presipitasi CuS pada Ultra Low Carbon Steel	19
2.6.3. Metode Galvanizing	20
BAB III METODOLOGI	
3.1. Alat dan Bahan Penelitian	23
3.1.1. Bahan-bahan Penelitian	23
3.1.2. Alat-alat Penelitian	23

3.2. Diagram Alir	25
3.3. Prosedur Penelitian	26
3.3.1. Preparasi Spesimen Kontrol	26
3.3.2. Preparasi Tembaga	27
3.3.3. Preparasi Sampel Copperizing	27
3.3.4. Proses peleburan Cu	27
3.3.5. Proses Copperizing	27
3.3.6. Pengujian	27
3.4. Rancangan Penelitian	29
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Analisis Pengamatan Makro	31
4.2. Analisis Pengujian Komposisi	35
4.3. Analisis Pengujian XRD	36
4.4. Analisis Pengujian SEM/EDX	44
4.5. Analisis Pengamatan Struktur Mikro	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	53
5.2. Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C (Callister,2007)	6
Gambar 2.2. Struktur mikro <i>Plain Carbon Steel</i>	8
Gambar 2.2. Struktur mikro <i>Cast Iron</i>	8
Gambar 2.4. Struktur mikro Bainit 0.4%C <i>Steel</i>	8
Gambar 2.5. Struktur mikro Martensit 0.35%C <i>Steel</i>	8
Gambar 2.6. Pengaruh penambahan unsur terhadap kekuatan (ASM Handbook, 1992).....	10
Gambar 2.7. Ilustrasi difusi pada Cu dan Ni (Manabu, 2004)	13
Gambar 2.8. Grafik difusivitas unsur terhadap Cu dan Al (Bryon, 2002)	14
Gambar 2.9. Diagram Fasa Fe-Cu	16
Gambar 2.10. Hubungan kesetimbangan antara <i>tensile strength</i> dan <i>Elongation</i> (Takaki,2004).....	18
Gambar 2.11. <i>Clustering</i> Cu yang sudah diaging t= 20 menit dan T=450°C pada komposisi 4% (Takaki,2004)	18
Gambar 2.12. Pengujian XRD presipitat sulfide (Ishigiro,et.al,2005)	19
Gambar 2.13. Presipitat Cu pada <i>low carbon steel</i> diambil dengan TEM (Ishigiro,et.al,2005).....	19
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	25
Gambar 4.1. Permukaan spesimen <i>copperizing pre-heat 800°C immerse time</i> (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x	31
Gambar 4.2. Permukaan spesimen <i>copperizing pre-heat 900C immerse time</i> (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x	32
Gambar 4.3. Penampang lintang spesimen <i>pre-heat 800°C</i> (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x	33
Gambar 4.4. Penampang lintang spesimen <i>pre-heat 900°C</i> (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x	34
Gambar 4.5. Hasil pola pengujian XRD spesimen control	37
Gambar 4.6. Hasil pola XRD untuk sampel control dan pre-heat 800°C (a) Sampel control (b) <i>Immerse time 3'</i> (c) <i>Immerse time 5'</i> (d) <i>Immerse time 7'</i>	38

Gambar 4.7. Perbandingan peak tertinggi (Fe- α) dan Cu sampel <i>pre-heat</i> 800°C (a) Spesimen kontrol (b) <i>immerse</i> 3' (c) <i>immerse</i> 5' (d) <i>immerse</i> 7'	39
Gambar 4.8. Hasil pola XRD sampel <i>pre-heat</i> 900°C (a) tanpa perlakuan (b) <i>immerse</i> 3' (c) <i>immerse</i> 5' (d) <i>immerse</i> 7'	41
Gambar 4.9. Perbandingan peak tertinggi (Fe- α) sampel <i>pre-heat</i> 900°C (a) tanpa perlakuan (b) <i>immerse</i> 3' (c) <i>immerse</i> 5' (d) <i>immerse</i> 7'	42
Gambar 4.10. Mikrografi SEM sampel (a) 800.3' (b) 900.3' bagian tepi (1000x).....	44
Gambar 4.11. <i>Mapping</i> mikrografi SEM sampel (a) 800.3' (b) 900.3' bagian tepi (1000x).....	45
Gambar 4.12 Mikrografi SEM sampel (a) 800.5' (b) 900.5' bagian tepi (1000x).....	45
Gambar 4.13. <i>Mapping</i> mikrografi SEM (a) sampel 800.5' (b) 900.5' bagian tepi (1000x).....	45
Gambar 4.14. Mikrografi SEM sampel (a) 800.7' (b) 900.7' bagian tepi (1000x)	46
Gambar 4.15. <i>Mapping</i> mikrografi SEM (a) sampel 800.7' (b) 900.7' bagian tepi (1000x)	46
Gambar 4.16. Mikrografi SEM sampel (a) 800.7' (b) 900.7' perbesaran 5000x	47
Gambar 4.17. Struktur mikro <i>Copperized</i> 900°C pendinginan udara dengan <i>Immerse time</i> (a) 3 menit (b) 5 menit (c) 7 menit 500x menggunakan etsa Nital	48
Gambar 4.18. grafik perubahan ukuran butir <i>copperizing pre-heat</i> 900°C	49
Gambar 4.19. Struktur mikro <i>Copperized</i> 800°C-pendinginan udara dengan <i>Immerse time</i> (a) 3 menit (b) 5 menit (c) 7 menit 500x menggunakan etsa Nital.....	50
Gambar 4.20. grafik perubahan ukuran butir <i>copperizing pre-heat</i> 800°C	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Komposisi ultra low carbon steel.....	19
Tabel 2.2. Hasil pengujian Coating.....	21
Tabel 3.1. Komposisi hasil pengujian <i>Spectroscopy</i> spesimen control (AISI 1006).....	26
Tabel 3.2. Rancangan Penelitian.....	29
Tabel 4.1. Komposisi unsur spesimen control	35
Tabel 4.2. Komposisi unsur spesimen <i>pre-heat</i> 800°C	36
Tabel 4.3. Komposisi unsur spesimen <i>pre-heat</i> 900°C	36
Tabel 4.4. Spesifikasi Peak Fe hasil pengujian XRD spesimen control..	37
Tabel 4.5. Spesifikasi Peak Cu tertinggi hasil pengujian XRD sampel <i>pre-heat</i> 800°C (TP = Tanpa Perlakuan)	39
Tabel 4.6. Spesifikasi peak Fe tertinggi sampel <i>pre-heat</i> 800°C (TP = Tanpa Perlakuan)	40
Tabel 4.7. Spesifikasi peak Fe tertinggi sampel <i>pre-heat</i> 900°C (TP=Tanpa perlakuan)	43
Tabel 4.8. Ukuran kristal Fe untuk masing-masing perlakuan (TP= Tanpa Perlakuan)	43
Tabel 4.9. Data ukuran butir dengan variasi <i>immerse time</i> , dengan <i>pre-heat</i> 900°C	49
Tabel 4.10. Data ukuran butir dengan variasi <i>immerse time</i> , dengan <i>pre-heat</i> 800°C	51

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Tembaga atau Cu pertama kali diproduksi manusia sekitar tahun 8900 sebelum masehi, akan tetapi teknik pemaduan tembaga telah dikembangkan oleh bangsa Mesopotamia sekitar tahun 3500 sebelum masehi terhitung hingga saat ini produksi tembaga selalu mengalami kenaikan hingga pada sekitar tahun 2003, produksi tembaga menyentuh angka 17.1 juta, 3.5 juta ton scrap digunakan pada proses manufaktur dan selebihnya digunakan untuk keperluan alat-alat listrik (Babich;2008). Cu mempunyai bentuk system kristal FCC pada temperature kamar, mempunyai sifat konduktivitas dan thermal yang sangat baik. Cu dan paduannya juga mempunyai sifat mekanik yang khas di antaranya ketahanan korosi, *machineability*, dan *ductility* yang juga baik, dengan karakteristik tembaga itulah yang akhirnya mendasari manusia untuk memadukan tembaga dengan logam lainnya untuk dapat memperbaiki sifat dari material tersebut, saat ini paduan tembaga yang paling banyak digunakan adalah perunggu dan kuningan (Kundig; 2006).

Paduan Besi dan tembaga belum banyak dikenal luas seperti halnya baja yang merupakan paduan besi dengan karbon, padahal tembaga dalam besi mampu menaikkan beberapa sifat mekanik besi tersebut dia antaranya dapat meningkatkan kekuatan apabila ditambahkan dalam jumlah sangat sedikit. Sifat tersebut dapat diidentifikasi dengan mengamati perubahan sifat fisis baja tersebut. Penambahan Cu di dalam besi dapat berperan sebagai *grain refinement agent* dan *solid solution strengthening agent* (ASM Handbook; 2007). Metode yang digunakan dalam pencampuran ini mengadopsi metode yang mirip dengan *hot dip galvanizing* yaitu dengan memanaskan baja hingga mencapai fasa austenite kemudian diimmerse ke dalam Cu molten pada temperature 1100°C. Dari data percobaan sebelumnya telah membuktikan bahwa Cu mampu berdifusi ke dalam Fe dengan

metode ini begitupun sifat mekanik yang dihasilkan cukup baik, akan tetapi sifat mekanik yang baik tersebut belum mampu diidentifikasi secara fisik atau alasan sifat-sifat tersebut dapat diperoleh. Untuk alasan tersebut, maka riset yang mendalam tentang perubahan perilaku fisik Cu yang telah berdifusi ke dalam Fe perlu dilakukan untuk dapat mengetahui darimana sifat-sifat mekanik tersebut berasal.

I.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana perbedaan kondisi fisik AISI 1006 akibat proses *Copperizing* ?
2. Bagaimana pengaruh *pre-heat* dan waktu celup pada proses *copperizing* AISI 1006 terhadap komposisi Cu?
3. Bagaimana pengaruh penambahan Cu pada proses *Copperizing* AISI 1006 terhadap Fasa dan ukuran butirnya?
4. Bagaimana pola persebaran Cu pada *Copperized* AISI 1006?

I.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Furnace berada dalam keadaan vakum
2. Tembaga yang digunakan dalam penelitian ini dianggap murni
3. Perubahan temperatur saat pemindahan spesimen diabaikan
4. Keadaan spesimen bersih dari deposit dan hasil coating saat pencelupan.

I.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis perbedaan kondisi fisik AISI 1006 akibat proses *Copperizing*.
2. Menganalisis pengaruh *pre-heat* dan waktu celup pada proses *copperizing* AISI 1006 terhadap komposisi Cu
3. Menganalisis fasa-fasa yang terjadi dan perubahan ukuran butir akibat penambahan Cu

4. Menganalisis pola persebaran Cu pada Copperized AISI 1006

I.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui efektifitas proses Copperizing dalam mendifusikan Cu ke *low carbon steel* yang nantinya dapat diaplikasikan sebagai metode alternatif pembuatan HSLA (*High Strength Low Alloy*) jenis *Weathering Steel* dengan lebih efisien.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Baja

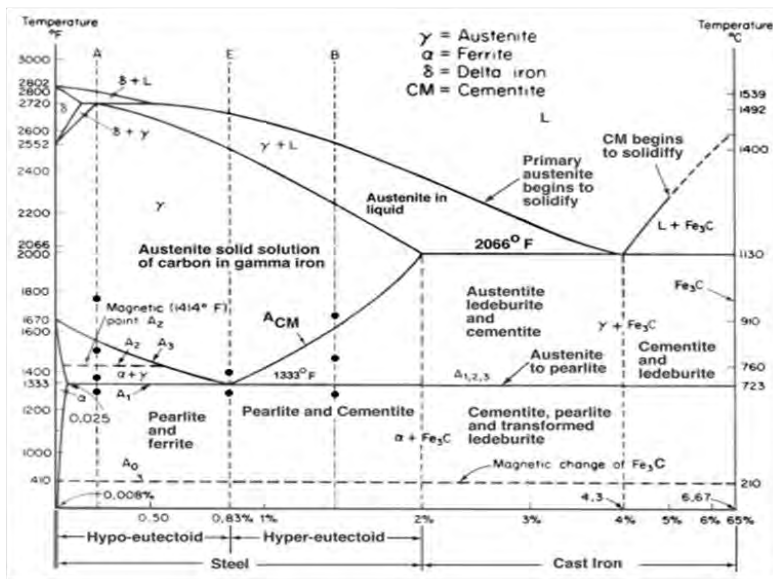
Baja digunakan pertama kalinya oleh bangsa Babylonia dan Assyria, orang-orang pada saat itu memainkannya Parzillu, sedangkan dalam bahasa ibrani disebut dengan barzel yang artinya sebagai logam harapan. Orang-orang menyebutnya demikian karena baja yang bahan baku utamanya adalah besi pertama kali ditemukan dari meteorit yang jatuh ke bumi dan menganggapnya jatuh dari surge. Baja telah menjadi komoditas terpenting dalam industri dunia hingga saat ini. Produksi baja terus menerus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, Babich (2008) dalam buku *Iron Making Textbook* menyebutkan bahwa produksi baja dunia selalu meningkat dari tahun ke tahun hingga pada tahun 2007 produksi baja sudah mencapai 1.320 milyar ton. Peran baja belum dapat digantikan oleh logam lain atau bahkan material lainnya maka dari itulah industri baja menjadi industri yang sangat strategis.

Menurut Digges (1966) dalam bukunya yang berjudul *Heat treatment of Iron and Steel* menyebutkan bahwa Baja adalah Logam paduan antara besi dengan karbon (dengan ada atau tidaknya unsur lain di dalamnya), dimana kandungan karbonnya tidak lebih dari 2.0%. Komposisi karbon di dalam suatu baja dapat menggambarkan sifat mekaniknya, semakin tinggi kadar karbonnya maka kekuatannya juga akan bertambah, sebaliknya jika kandungan karbonnya rendah maka kekuatannya juga akan rendah. Thomas juga menambahkan bahwa komposisi 2.0% menjadi pembatas antara baja dan besi tuang (*cast iron*). Pada dasarnya besi juga dapat dikatakan sebagai baja selagi komposisi karbon tidak membuatnya mengalami reaksi eutektik, dengan demikian dapat dikatakan bahwa komposisi 2.0% hanya terjadi pada kondisi yang sangat ekuilibrium. Surdia (1999) menyatakan bahwa baja merupakan bahan yang kaya akan sifat-sifat karena dari logam tersebut dapat membentuk berbagai macam struktur.

Pembahasan mengenai sifat dan karakteristik baja dapat dimulai dengan mempelajari diagram fasanya.

II.1.1. Diagram fasa Fe-Fe₃C

Diagram fasa Fe-Fe₃C merupakan gambaran kondisi kesetimbangan antara komposisi besi dengan karbon, diagram ini sangat penting guna memperkirakan fasa yang terjadi sekaligus sifat yang terbentuk oleh baja tersebut. Adapun gambar diagram fasa Fe-Fe₃C adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1. Diagram fasa Fe-Fe₃C (Callister,2007)

Gambar di atas hanya menunjukkan kesetimbangan antara Fe dan C saja meskipun dalam baja sebenarnya ada unsur-unsur lain seperti Silikon, Mangan, Posfor dll. akan tetapi komposisinya sangat kecil dan tidak memberikan pengaruh utama terhadap diagram fasa sehingga unsur-unsur tersebut hanya dianggap sebagai pengotor. Garis A₀ yaitu garis isothermal yang terdapat pada temperature 213°C, garis ini menandakan terjadinya

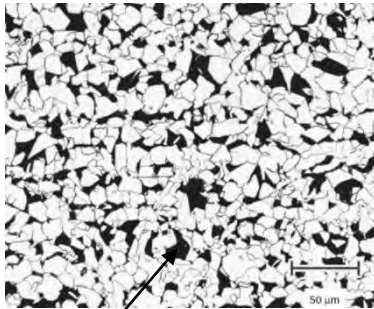
transformasi baja yang bersifat magnetic menjadi non magnetic pada proses pemanasan.

II.1.1.1. Fasa

Fasa merupakan bagian homogen yang memiliki sifat dan bentuk system kristal yang sama. Diagram fasa Fe-Fe₃C menggambarkan letak fasa-fasa pada paduan Fe dan C diantaranya adalah Ferit, austenite dan sementit. Ferit mempunyai system kristal BCC (*Body Centered Cubic*), sifatnya ulet, lunak dan kekuatannya rendah. Ferit dalam diagram fasa ini terdapat dua jenis yaitu ferit α yang terdapat pada temperature rendah dan ferit δ yang terdapat pada temperature tinggi, keduanya memiliki karakteristik yang sama. Austenit adalah fasa yang mempunyai system kristal FCC (*Face Centered Cubic*), sifatnya ulet, lunak dan kekuatannya rendah. Sifat-sifat tersebut hampir mirip dengan ferit akan tetapi karena system kristalnya yang berbeda maka austenite dianggap sebuah fasa tersendiri. Fasa ini juga merupakan fasa yang sering digunakan dalam proses *heat treatment* agar dapat merekayasa sifat suatu baja. Terakhir adalah sementit, sementit sering juga disebut sebagai karbida oleh karena kadar karbon yang terdapat dalam besi terlalu besar, sifat sementit ini keras, kekuatan dan kekakuannya tinggi. Sifat tersebut dapat terjadi karena tingginya kadar karbon yang terinterstisi didalamnya sehingga menaikkan sifat mekaniknya.

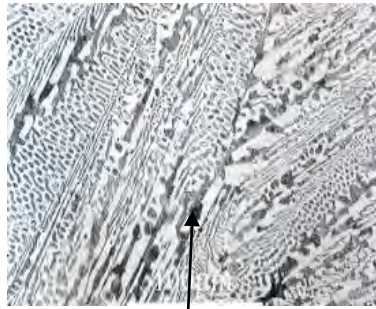
II.1.1.2. Struktur

Selain fasa terdapat juga istilah struktur, definisi struktur dalam ilmu Metalurgi adalah bagian yang heterogen yang tersusun atas dua atau lebih fasa. Struktur yang terdapat pada diagram Fe-Fe₃C adalah Perlit dan Ledeburit, perlit merupakan struktur berbentuk lamel berselang seling antara Ferit α dengan Austenit akibat reaksi eutektoid, sementara Ledeburit adalah struktur lamel berselang seling antara austenite dengan sementit akibat reaksi eutektik. Adapun gambar struktur yang dimaksud adalah:



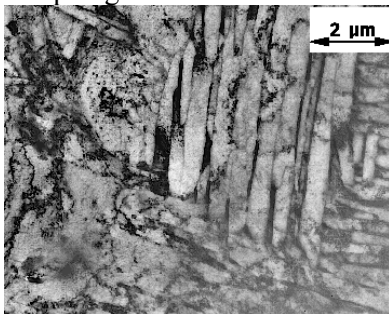
Pearlite

Gambar 2.2. Struktur mikro
Plain carbon steel

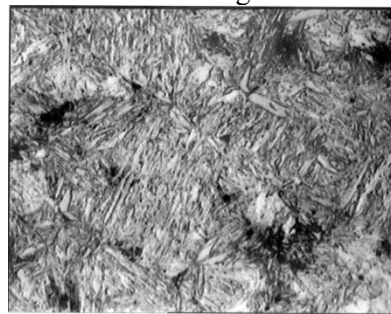
Ledeburite which transformed
into Sementit+Pearlite

Gambar 2.3. Struktur mikro *Cast iron*

Menurut Surdia (1999) dalam bukunya yang berjudul *Pengetahuan Bahan Teknik* menjelaskan bahwa sebenarnya struktur baja tidak hanya yang terdapat pada diagram Fe-Fe₃C saja, melainkan ada fasa lain yang dapat terjadi karena proses pendinginan yang tidak semestinya (*non equilibrium*). Struktur tersebut di antaranya adalah Martensit, Bainit, Sorbit dan Trostit Adapun gambar struktur-struktur tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4. Struktur mikro
Bainit 0.40%C steel



Gambar 2.5. Struktur mikro
Martensit 0.35%C steel

II.2. High Strength Low Alloy (HSLA)

High Strength low alloy (HSLA) adalah bagian dari baja karbon rendah yang sengaja ditambahkan sedikit kandungan unsur tertentu sehingga membuatnya memiliki kekuatan yang melebihi 275 MPa (40 ksi) saat pada kondisi yang normal. Sifat mekanik ini terkadang dibarengi dengan ketahanan korosi yang lebih baik daripada baja lain pada umumnya. Lebih dari itu HSLA juga justru memberikan kekuatan yang lebih tinggi pada kandungan karbon yang relative lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa dengan kadar karbon yang lebih rendah memungkinkan unsur lain dapat larut lebih banyak di dalam Fe. Sifat lain yang lebih baik selain kekuatan adalah kemampuan baja untuk dilas (*weldability*).

Umumnya HSLA ditemukan di dalam produk-produk yang telah dilakukan mechanical treatment sebelumnya seperti dalam bentuk lembaran, billet, atau bentuk structural lainnya. Hal tersebut dimaksudkan guna mendapatkan sifat mekanik yang jauh lebih baik lagi. Perlakuan tersebut antara lain sebagai berikut:

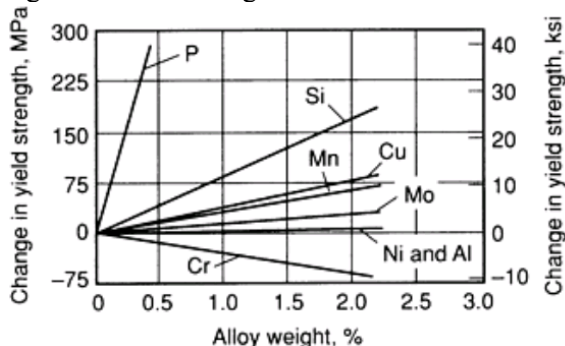
- *The controlled rolling* pengerasan akibat presipitasi HSLA digunakan untuk mendapatkan butiran austenite yang lebih murni, selain itu butiran austenite yang murni nantinya akan mempermudah butiran untuk dideformasi, sehingga selama pendinginan terjadi dari butiran austenite menjadi butiran ferit terjadi kenaikan kekuatan tarik yang cukup signifikan.
- *The accelerated cooling* sebenarnya HSLA yang diroll cenderung menghasilkan butiran ferit murni selama proses pendinginan dari austenite. Akan tetapi kecepatan pendinginan yang terlalu tinggi kadang tidak cukup untuk membentuk ferit seutuhnya, di sisi lain apabila pendinginannya terlalu lambat justru akan menimbulkan overaging terhadap presipitat.
- *The quenching or accelerated air or water cooling* terhadap baja karbon rendah ($<0.08\%C$). Mikrostruktur ini memberikan efek kombinasi yang baik terutama pada kekuatan (275 sampai 690 MPa, atau 60 sampai 100 ksi),

weldability dan formability, serta kekakuannya.

- *The normalizing* HSLA yang mengandung vanadium untuk menata ulang ukuran butir, sehingga dapat memperbaiki kekakuan dan kekuatan.
- *The intercritical annealing* HSLA (dan juga baja yang mengandung mangan dengan carbon rendah) untuk menghasilkan mikrostruktur yang dual-phase (martensit-martensit yang dikelilingi matriks ferit). Mikrostruktur ini memang menghasilkan kekuatan yang lebih rendah, tetapi justru HSLA jenis ini mempunyai kombinasi kekuatan dan keuletan yang lebih baik dibandingkan HSLA konvensional lainnya.

II.2.1. *Weathering steels*

Baja HSLA jenis ini mengandung tembaga (Cu) dan beberapa unsur lainnya dalam presentase yang kecil, baja ini memiliki ketahanan korosi yang baik, memberikan efek solid-solution strengthening dan dapat memperbaiki mikrostruktur ferit, adapun pengaruh penambahan beberapa unsur dalam baja HSLA jenis ini digambarkan dalam grafik berikut



Gambar 2.6. Pengaruh penambahan unsur terhadap kekuatan (ASM Handbook, 1992)

Beberapa spesifikasi pada tabel ASTM di atas, *weathering steels* dengan ketahanan korosi yang baik ditunjukkan oleh

ASTM A 242 untuk keperluan konstruksi biasa, sementara untuk keperluan konstruksi yang lebih berat biasanya menggunakan ASTM A 588. Ketahanan korosi dari kedua baja tersebut didapatkan dari oksida yang dihasilkan di permukaan. Menurut penjelasan dalam ASM Metals Handbook Vol.01 (1990) bahwa sebenarnya pada awalnya material ini akan mengalami laju korosi yang sama dengan baja karbon rendah, akan tetapi laju korosinya akan menurun setelah beberapa tahun.

Oksida yang melapisi baja memiliki daya rekat yang kuat, dan bersifat hidrofobik sehingga sangat baik dalam proteksi korosi. Di sisi lain apabila dibandingkan dengan *plain carbon steel* yang bertekstur kasar di permukaan maka membuat air mudah terperangkap di permukaannya, terlebih lagi tidak ada lapisan oksida yang melindunginya dari oksida maupun air. Meskipun ASTM A 242 dan ASTM A 588 memiliki sifat yang baik, ternyata sifat-sifat tersebut tidak berlaku bagi lingkungan yang sangat korosif, seperti lingkungan bertekanan tinggi, lingkungan air laut maupun lingkungan yang mengandung gas asam tinggi karena lapisan oksida tersebut tidak akan terbentuk secara maksimal sehingga ketahanan korosinya tidak jauh berbeda dengan baja karbon biasa pada umumnya.

HSLA weathering diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu:

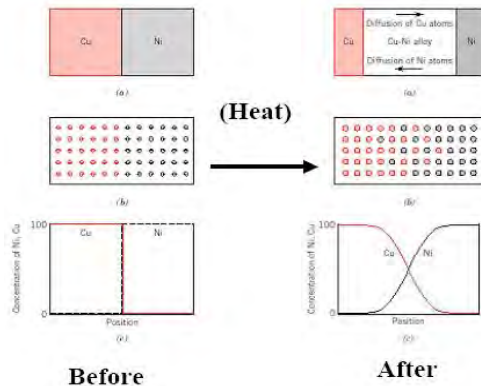
- *Weathering steels* dengan kandungan posfor rendah dan penambahan unsur paduan untuk memperkuat solid solution dan meningkatkan *corrosion resistance*.
- *Weathering steels* dengan kandungan posfor relative tinggi (0.05-0.15%) digunakan untuk menambah kekuatan dan ketahanan korosi, perbedaannya dengan *weathering steel* dengan posfor rendah adalah unsur paduan yang ditambahkan lebih sedikit.

Microalloying dengan menambahkan V atau Nb dapat meningkatkan kekuatan tarik *weathering steels*, bahkan Nb juga dapat meningkatkan kekakuan. Perlakuan Normalizing dapat memperbaiki ukuran butir dan itulah yang membuat kekuatan dan kekakuannya meningkat. Akan tetapi normalizing hanya

digunakan untuk memperbaiki ukuran butir, efeknya terhadap baja tersebut adalah mengubah hardenabilitynya karena pada dasarnya setiap penambahan unsur paduan dan kadar karbon akan menggeser kurva transformasi ke kanan, dengan demikian kemungkinan didapatkan struktur bainit akan semakin tinggi.

II.3. Difusi

Manabu (2014) dalam bukunya yang berjudul *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering* mendefinisikan bahwa difusi merupakan transport antar material yang terjadi dari material dengan konsentrasi rendah ke material yang konsentrasinya lebih tinggi secara kimiawi, sementara itu Adolf Eugen Fick mengemukakan bahwa difusi adalah suatu kejadian spontan yang terjadi pada suatu sistem yang terdiri dari dua atau lebih komponen yang memiliki konsentrasi yang berbeda-beda, maka akan terdapat kecenderungan alamiah untuk terjadi transfer massa pada arah yang akan menghilangkan atau meminimalisasi adanya perbedaan konsentrasi di dalam sistem tersebut, pernyataan tersebut kemudian dikenal dengan nama hukum pertama Fick. Difusi memegang peranan yang sangat penting dalam dunia Material dan Metalurgi karena banyak sekali proses di dalamnya yang melibatkan peristiwa difusi, seperti pada proses ekstraksi dan pemurnian logam. Dalam ilmu Fenomena Transport, difusi digolongkan ke dalam transfer massa atau *mass transport* karena adanya massa yang berpindah akibat adanya gradient konsentrasi. Difusi akan terus terjadi dan akan berhenti saat kedua buah material sudah saling homogen. Berikut adalah ilustrasi difusi yang terjadi pada dua buah material:



Gambar 2.7. Ilustrasi difusi pada Cu dan Ni (Manabu,2004)

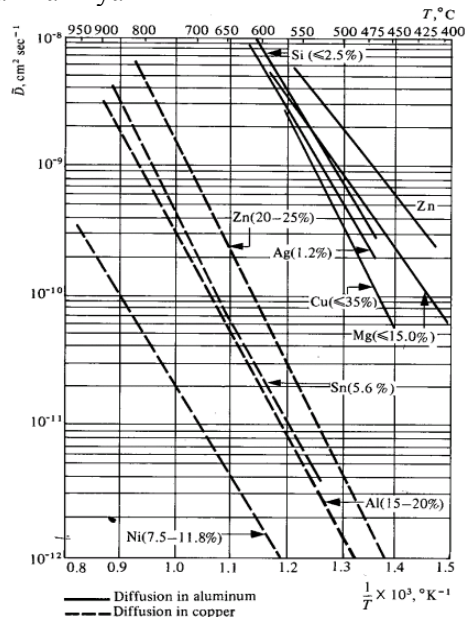
Difusi dapat terjadi di semua jenis material baik itu solid, liquid maupun gas, sedangkan pada gambar 2.9. terjadi untuk material solid, atom Cu akan saling bertukar posisi dengan atom Ni

II.3.1. Difusi pada solid

Difusi pada solid dapat terjadi apabila atom-atom di dalamnya memiliki cukup energy untuk berpindah dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah hingga mencapai sebuah kesetimbangan/homogeny. Umumnya difusi pada solid dibagi atas beberapa jenis, ada yang berdasarkan proses terjadinya, maupun mekanisme terjadinya. Berdasarkan proses terjadinya difusi pada solid terbagi menjadi dua jenis yaitu Interdifusi dan *self diffusion*, sedangkan berdasarkan mekanismenya difusi pada solid terbagi atas dua jenis yaitu Difusi Interstisi dan difusi substitusi.

Interdifusi adalah difusi yang terjadi antara dua buah material solid berbeda jenis atau sejenis dengan catatan memiliki konsentrasi yang berbeda. Interdifusi ini terjadi apabila atom-atom kedua buah material tersebut memiliki cukup energy untuk saling berpindah, energy yang dimaksud adalah energy panas/temperature. Kedalaman maupun kemampuan atom untuk saling berdifusi sangat tergantung dari energy, saturasi, dan waktu yang

disediakan, umumnya difusi terjadi hanya terjadi di antara dua permukaan benda yang saling kontak, akan tetapi difusi ini akan bisa mencapai jarak yang lebih jauh apabila factor-faktor tersebut dipenuhi, sedangkan difusi baru akan berhenti setelah keduanya dalam keadaan homogen atau karena atomnya sudah kehabisan energy untuk berdifusi lagi. Contoh Interdifusi yang terjadi sama seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.9. di mana Cu dan Ni saling berdifusi. Berikut adalah nilai difusifitas beberapa logam terhadap logam lainnya



Gambar 2.8. grafik difusivitas unsur terhadap Cu dan Al (Bryon,2002)

Besarnya nilai interdifusi antara dua buah material solid dapat dihitung dengan pendekatan penurunan rumus hukum Ficks II, adapun formulanya adalah sebagai berikut:

$$\tilde{D} = X_a D_a + X_b D_b$$

Dimana:

\tilde{D} adalah interdifusi

X adalah

D adalah Difusi interinsik suatu unsur

Difusi vakansi dan substitusi, Difusi vakansi merupakan difusi yang terjadi akibat adanya vakansi pada atom sehingga kekosongan atom tersebut diisi oleh atom dari material lain, kekosongan atom tersebut dapat terjadi saat atom terkena radikal bebas ataupun kehabisan energy saat bergerak ke tempat lain. Difusi substitusi adalah mekanisme difusi dimana atom-atom suatu material bertukar posisi dengan atom-atom dari material lain. Mekanisme ini terjadi hanya jika atom-atom ke dua material memiliki ukuran yang sama atau hampir sama. Oleh karena ukurannya yang harus sama itulah maka mekanisme geser yang terjadi tidak terlalu signifikan begitupun dengan sifat mekaniknya yang tidak terlalu berubah. Contoh dari difusi ini adalah difusi atom Mg dan Cu.

II.3.2. Hole theory

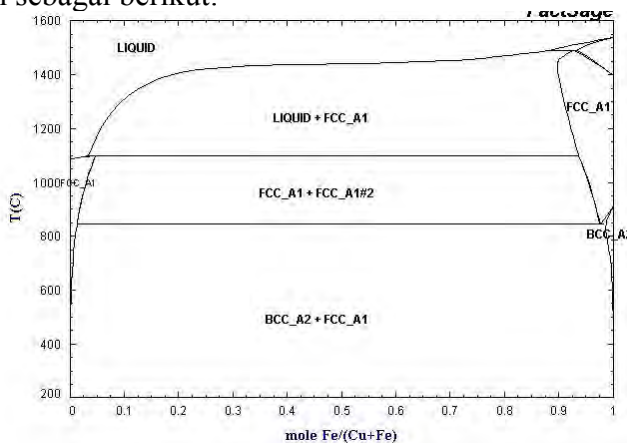
Hole theory pada liquid sebenarnya menyatakan bahwa susunan atom tertentu memiliki lubang atau vancancy yang acak, lubang-lubang tersebut adalah tempat untuk berdifusi. Konsentrasi pada lubang ini menjadi sangat besar karena terjadi peningkatan volume pada saat melting, sehingga difusi pada liquid menjadi lebih besar daripada solid di bawah temperature melting. Yang terjadi adalah peningkatan difusivitas yang sangat besar pada zona peralihan antara solid ke liquid pada melting point. (Geiger;1973)

Hole theory ini tidak jauh berbeda dengan yang dialami pada material solid, material solid memiliki susunan atom yang lebih rapat dan tetap, akan tetapi apabila logam solid dipanaskan, maka atom-atom di dalamnya akan bergetar atau bervibrasi, vibrasi atom-atom ini menyebabkan pertambahan vakansi atau lubang-lubang dalam susunannya. Lubang-lubang tercipta juga terjadi akibat adanya pertambahan volume benda tanpa dibarengi pertambahan jumlah atom, peristiwa ini umumnya disebut

pemuaian. Dengan demikian difusi akan mudah terjadi pada material solid yang dipanaskan, semakin banyak energy panas yang diserap maka semakin banyak pula atom-atom yang bergetar sehingga difusi pun akan lebih mudah terjadi. Salah satu peristiwa yang mengaplikasikan teori ini adalah peristiwa Pack Carburizing. (Bryon,2002)

II.4. Diagram fasa Fe-Cu

Diagram fasa Fe-Cu menggambarkan pola yang terjadi apabila Fe dan Cu dicampurkan. Adapun diagram fasanya adalah sebagai berikut:



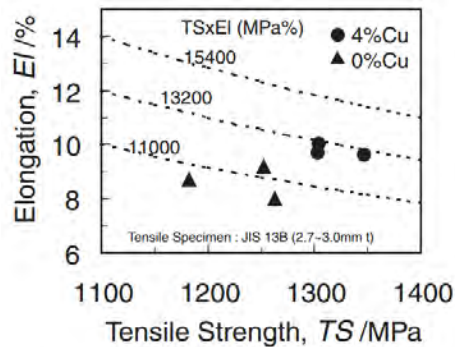
Gambar 2.9. Diagram Fasa Fe-Cu

Berdasarkan diagram fasa di atas, terlihat bahwa Fe dengan Cu tidak akan membentuk senyawa, karena terlihat tidak adanya fasa intermetalik di dalamnya, sehingga dapat dikatakan bahwa Fe dan Cu membentuk cluster masing-masing dengan system kristal yang berbeda pada temperature kamar. Apabila komposisinya dapat mencapai garis isothermal eutectoid maka dapat terjadi struktur berlamel seperti halnya perlit di dalam struktur baja. Lamel-lamel tersebut tersusun atas fasa yang dinamakan A₂ (BCC) dan A₁(FCC).

II.5. Penelitian sebelumnya

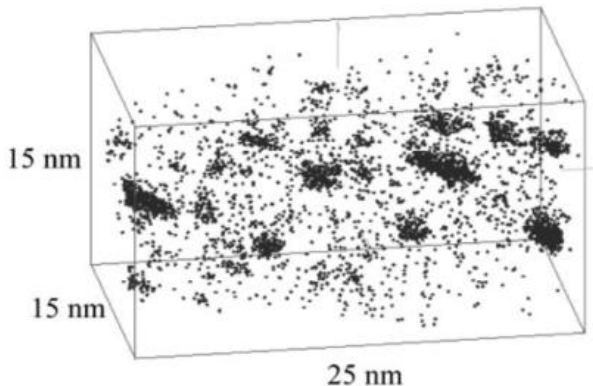
II.5.1. Efek penambahan Cu terhadap kekuatan tarik dan *grain refinement* baja

Berdasarkan Jurnal yang ditulis Takaki (2004) menyatakan bahwa Cu di dalam Fe memiliki pengaruh yang besar terhadap keseimbangan antara kekuatan dan keuletan dibandingkan sifat serupa pada baja-baja lainnya, hal tersebut terutama dapat terjadi apabila Cu di dalam Fe berbentuk presipitat. Cu akan berkumpul membentuk clustering tersendiri di luar butiran, selain itu Cu mampu berperan sebagai grain refiner ferit dalam Fe bahkan Fujioka et.al menemukan bahwa ukuran ferit jauh menurun hingga $1\mu\text{m}$ sehingga dalam risetnya yang berjudul Super-Metal Project, fenomena tersebut dinamakan dengan *ultra-grain refinement*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mencampurkan kedua unsur dalam bentuk molten ingot pada Temperatur 1150°C dilanjutkan dengan cold rolling kemudian dipanaskan ulang selama sepuluh menit ($T=830^{\circ}\text{C}$) pendinginan dengan air, terakhir paduan ini diaging pada temperature $300-650^{\circ}\text{C}$ selama 20 menit. Proses grain refinement sendiri terjadi saat rekrisalisasi ferit, dan pada saat itulah fenomena ultra grain refinement terjadi. Berdasarkan apa yang dijelaskan di dalam jurnal, pembuktian bahwa Cu berperan sebagai penghalus butir sangat penting dilakukan seperti dengan menggunakan intercept maupun dengan metode platimetri. Adapun terjadinya penguatan dijabarkan dalam bentuk gambar grafik 2.10:



Gambar 2.10. Hubungan kesetimbangan antara *tensile strength* dan *elongation* (Takaki,2004)

Pembuktian bahwa Cu membentuk clustering dijabarkan melalui pengujian OTAP (Optical Tomographic Atom-Probe) yang gambarnya adalah sebagai berikut:



Gambar 2.11. *Clustering* Cu yang sudah diaging $t=20$ menit dan $T=450^{\circ}\text{C}$ pada komposisi 4% (Takaki,2004)

Berdasarkan pengujian OTAP yang telah dilakukan menggambarkan adanya persebaran Cu yang terdapat dalam spesimen secara 3 dimensi, Cu membentuk seperti gumpalan-gumpalan di beberapa bagian. Dalam hal ini pengujian OTAP

hanya mengidentifikasi salah satu titik / bagian saja dengan skala hingga nano meter.

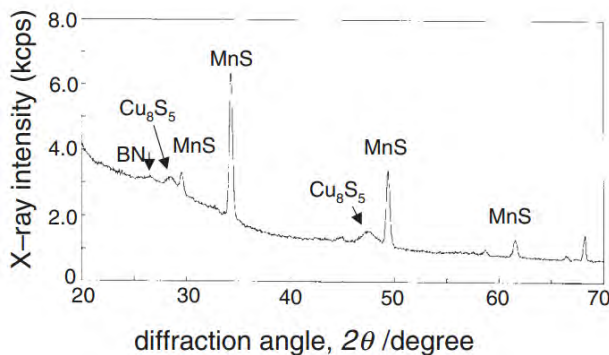
II.5.2. Presipitasi CuS pada Ultra Low Carbon Steel

Ishigiro (2005) melakukan studi terhadap presipitasi yang terjadi akibat adanya Cu yang tersisa pada baja karbon rendah, baja tersebut mempunyai komposisi unsur sebagai berikut:

Tabel 2.1. Komposisi ultra low carbon steel

Unsur	Konten (%)	Unsur	Konten(%)
C	0.0011	Cu	0.01
Si	0.01	Al	0.038
Mn	0.17	N	0.0013
P	0.016	B	0.013
S	0.0073		

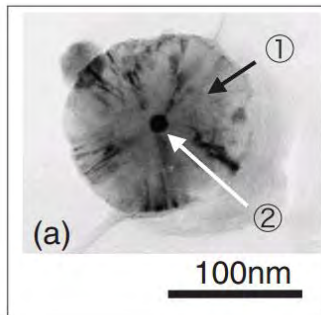
Dari data pengujian XRD yang telah dilakukan didapatkan grafik sebagai berikut



Gambar 2.12. Pengujian XRD presipitat sulfide (Ishigiro,et.al,2005)

Gambar 2.15 memperlihatkan pola XRD presipitat Cu yang terbentuk pada sampel tersebut, rata-rata peak yang terbentuk adalah MnS artinya presipitat yang mungkin terjadi

adalah MnS sedangkan Cu_8S_5 juga terlihat membentuk peak meskipun intensitasnya tidak setinggi MnS. Hasil XRD ini merupakan hasil karakterisasi presipitat yang dikumpulkan melalui *electrochemical etching*. Maka serbuk yang menempel pada bagian katoda nantinya dikumpulkan dan dikeringkan selanjutnya dikarakterisasi.



Gambar 2.13. Presipitat Cu pada low carbon steel diambil dengan TEM (Ishigiro,et.al.2005)

II.5.3. Metode Galvanizing

Coni (2004) telah melakukan studi galvanizing terhadap SAE 1006, prosedur yang digunakan dalam proses galvanizingnya antara lain dengan melakukan hot rolling pada temperature 870°C , selanjutnya dilakukan cold rolling sampai ketebalannya berkurang antara 70%-80%, baja yang sudah berbentuk pelat tadi selanjutnya dipanaskan kembali pada temperature $560\text{-}580^{\circ}\text{C}$ dan langsung dicelupkan pada molten metal, terakhir dilakukan proses annealing yang terkontrol di dalam furnace. Parameter yang menjadi acuannya adalah ingin mendapatkan komposisi coating Zn dan 55% Al-Zn sesuai dengan standar ASTM A653M (2004) dan ASTM A792M (2003). Setelah melakukan serangkaian pengujian maka didapatkan hasil sebagaiberikut:

Tabel 2.2. Hasil pengujian Coating

Coating	Standard	Designation	Weight (g/m ²)	Thickness (μm)
Zinc	ASTM A 653 (2004)	G90	275	38.51
55% Al-Zn	ASTM A 792M (2003)	AZM 150	150	40.54

\Dari data di atas menunjukkan bahwa galvanizing meninggalkan lapisan coating dengan ketebalan tertentu, maka perlu studi lebih lanjut terhadap *copperizing* yang tidak meninggalkan lapisan pada permukaan baja, meskipun metode yang digunakan mirip dengan *galvanizing*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

III.1. Alat dan Bahan Penelitian

III.1.1. Bahan-bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam Penelitian ini antara lain:

1. Baja AISI 1006
2. Tembaga murni
3. Larutan HNO_3
4. Methanol 90%
5. Metal Polish
6. Kain Bludru
7. Kawat Baja

III.1.2. Alat-alat Penelitian

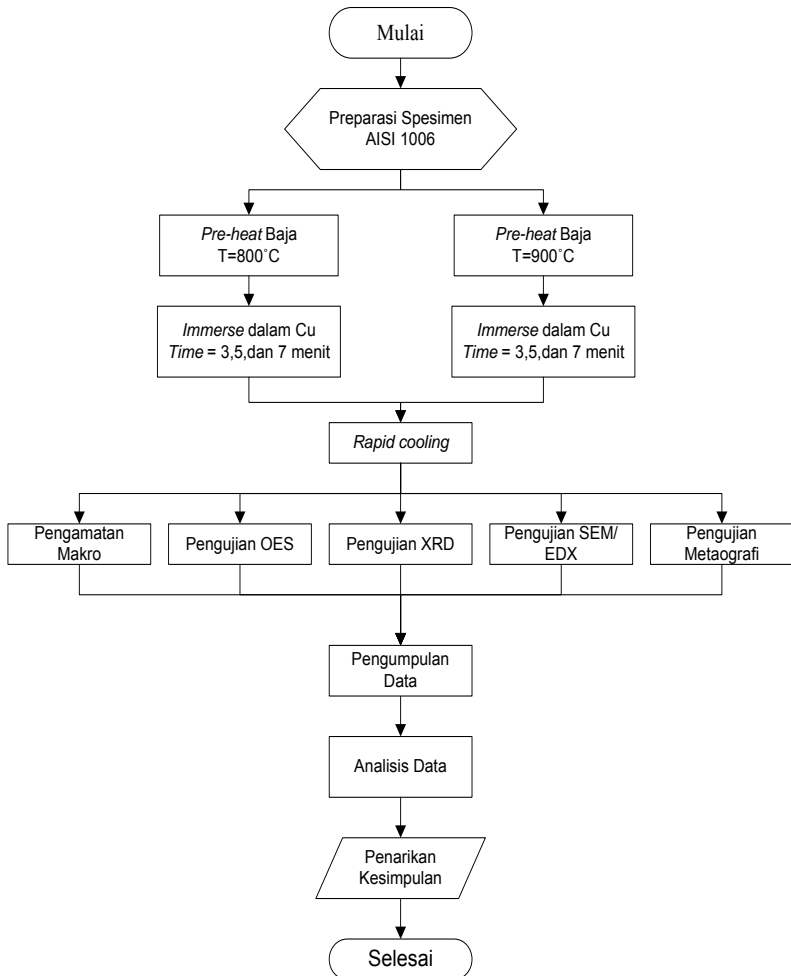
Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Gerinda Tangan
Gerinda Tangan digunakan untuk memotong specimen lembaran berukuran besar menjadi ukuran yang lebih kecil.
2. Gergaji tangan
Digunakan untuk memotong specimen yang berukuran sangat kecil yang tidak dapat dipotong dengan menggunakan Gerinda tangan.
3. Gastronom Stainless steel
Gastronom yang terbuat dari stainless steel berfungsi sebagai wadah bagi molten Cu, bahan stainless steel dipilih karena mampu bertahan hingga temperature 1200°C .
4. Muffle furnace
Muffle furnace digunakan untuk melakukan *pre-heat* pada baja sekaligus untuk meleburkan Cu untuk keperluan proses *copperizing*.
5. Alat kikir

Kikir digunakan untuk meratakan permukaan specimen agar lebih mudah untuk dilakukan pengamplasan.

6. Kertas Amplas
Kertas amplas digunakan untuk meratakan permukaan specimen yang akan di etsa guna melakukan proses etsa.
7. Mesin Polishing
Mesin polishing digunakan untuk menghilangkan *scratch* yang tidak dapat dihilangkan dengan pengamplasan.
8. Cutting Tool
Cutting tool digunakan untuk memotong specimen yang cukup besar dan dibagi-bagi menjadi beberapa ruas specimen yang lebih kecil.
9. Bor duduk
Melubangi specimen agar dapat dikaitkan dengan kawat baja sehingga memudahkan dalam proses pengangkatan maupun pemindahan specimen dari dalam furnace.
10. Penjepit Logam
Penjepit logam digunakan untuk memindahkan specimen dari maupun ke dalam furnace.

III.2. Diagram Alir



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

III.3. Prosedur Penelitian

III.3.1. Preparasi Sampel Kontrol

Preparasi sampel pertama kali diperuntukkan untuk uji komposisi unsur. Preparasi specimen ini dimulai dengan memotong specimen menggunakan gerinda tangan berbentuk pelat berdimensi $P \times l \times t : 3 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 0.3 \text{ cm}$, setelah itu specimen dikikir dan diampas dengan menggunakan amplas grade 150 dengan tujuan menghilangkan pengotor-pengotor yang terdapat pada permukaan baja. Pengujian *spectroscopy* dilakukan untuk mengetahui komposisi awal specimen sekaligus memastikan bahwa pada sampel awal Cu yang terdapat didalam Fe tersebut hampir tidak ada atau nilainya sangat kecil, specimen yang telah dilakukan pengujian ini dijadikan sebagai specimen control. Berdasarkan pengujian komposisi yang telah dilakukan dengan alat OES (*Optical Emission Spectroscopy*) didapatkan data komposisi untuk Baja tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1. Komposisi hasil pengujian *Spectroscopy* spesimen kontrol

Elements	Ave. wt%		Ni	0.0292
Fe	99.5		Al	0.0454
C	0.0358		Co	< 0.0050
Si	0.02		Cu	0.0375
Mn	0.210		Nb	0.0140
P	0.0091		Ti	< 0.0050
S	0.0080		V	< 0.0050
Cr	0.0276		W	< 0.0050
Mo	< 0.0050		Pb	< 0.0050

III.3.2. Preparasi Tembaga

Tembaga yang dipreparasi adalah tembaga yang digunakan untuk proses cooperizing. Tembaga murni dari ukuran yang cukup besar dipotong menjadi beberapa bagian yang lebih kecil agar tembaga lebih mudah mencair karena luas permukaan

yang lebih luas, selanjutnya tembaga dimasukkan secukupnya ke dalam *crucible* yang terbuat dari *grafit* dengan dimensi 21 x 8 x 3 cm³.

III.3.3. Preparasi Sampel *cooperizing*

Sampel yang akan dicooperizing dipotong-potong dengan dimensi 3 x 6 x 0.3 cm. di bagian atas sampel diberi lubang untuk mengaitkan specimen dengan kawat baja, selanjutnya baja yang telah dipotong-potong tadi dikikir dan diampas dibagian permukaannya dengan tujuan menghilangkan pengotor sehingga memudahkan proses difusi Cu ke dalam Fe karena penghalangnya telah dibersihkan.

III.3.4. Proses Peleburan Cu

Cu yang telah dipreparasi dan ditempatkan di dalam *gastronom stainless steel* selanjutnya dipanaskan sampai temperature 1100°C serta diholding selama beberapa menit sampai Cu menjadi benar-benar molten seluruhnya.

III.3.5. Proses *Cooperizing*

Pada proses ini, Fe yang telah dilakukan pre-heat pada furnace yang terpisah kemudian diangkat dan dicelupkan ke dalam molten Cu selama beberapa menit, adapun variasi waktu celup (*immerse time*) yang akan dilakukan adalah 3, 5, dan 7 menit. Setelah dilakukan pencelupan dengan variasi waktu tersebut, selanjutnya semua specimen didinginkan dengan laju pendinginan udara (*rapid cooling*).

III.3.6. Pengujian

a. Pengamatan Makro

Pengamatan Makro dilakukan dengan menggunakan mikroskop stereo perbesaran 8x dengan tujuan mengamati perbedaan fisik permukaan dan bagian penampang spesimen antara sebelum dan sesudah *copperizing*.

b. Pengujian OES

Pengujian Spectroscopy dilakukan di kampus PPNS-Surabaya untuk menghitung presentase Cu yang terdifusi ke dalam Fe, presentase Cu yang terdifusi ini dibandingkan dengan komposisi specimen awal yang belum dilakukan proses *copperizing*. Mengetahui presentasi Cu yang dapat terdifusi ke dalam Fe berguna untuk data rujukan dengan diagram fasa Fe-Cu

c. Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS dengan tujuan untuk mengidentifikasi perubahan kristal pada α -Fe akibat difusi Cu ke dalam butir, setelah mendapatkan grafik dari serangkaian pengujian menggunakan XRD maka selanjutnya akan diidentifikasi dengan bantuan software match! Versi 2.0 untuk mengetahui system kristal yang terbentuk pada specimen yang telah dicopperizing.

d. Pengujian SEM/EDX

Pengujian menggunakan SEM/EDX dilakukan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan instrumen *Scanning Electron Microscopy (SEM)* tipe FEI INSPECT 550 dan dengan tujuan mengetahui persebaran unsur Cu dalam baja yang telah dilakukan proses *copperizing*.

e. Pengujian Metalografi

Pengujian mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan mikroskop optic Olympus BX51M-RF, pengujian mikrostruktur bertujuan untuk melihat butiran perlit dan ferit di dalam baja, butiran ini akan diukur ukurannya dengan Metode Hayn Intercept agar dapat mengetahui ada atau tidaknya perubahan ukuran butiran setelah dilakukan proses *cooperizing*.

III.4. Rancangan Penelitian

Tabel 3.2. Rancangan Penelitian

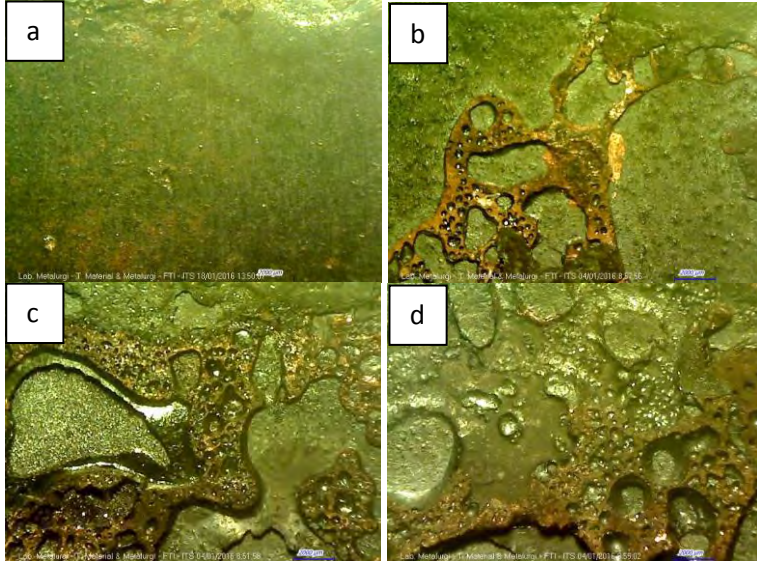
Variabel		Pengujian				
T (°C)	t (menit)	Pengamatan Makro	OES	XRD	SEM/ EDX	Metalografi
800	3					
	5					
	7					
900	3					
	5					
	7					

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

IV.1. Analisis Makro

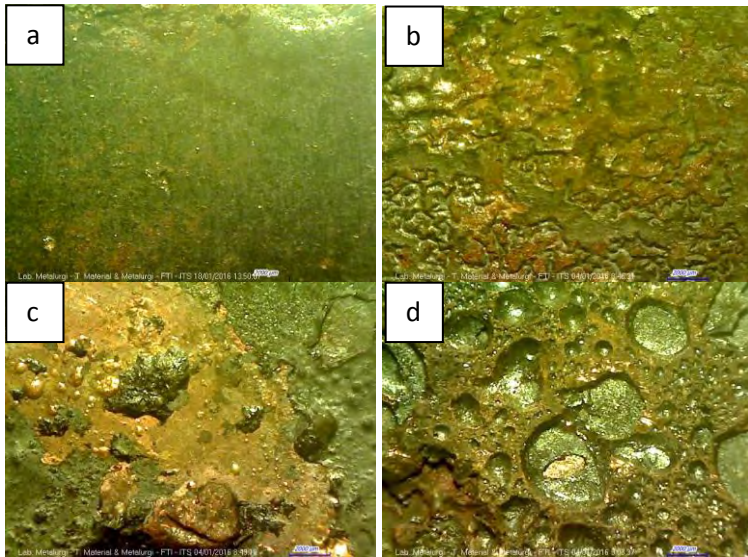
Analisis makro dilakukan dengan mengambil foto specimen guna membandingkan kenampakan fisik specimen.



Gambar 4.1. Permukaan specimen *copperizing pre-heat 800°C immerse time* (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x

Gambar 4.1. memperlihatkan penampakan fisik specimen setelah dicopperizing. Spesimen (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit. Secara keseluruhan sampel memperlihatkan adanya lapisan Cu yang terbentuk di permukaannya yakni ditunjukkan dengan warna merah. Lapisan tersebut tidak merata sehingga ada bagian yang tidak terlapsi. Menurut ASM Handbook (1990) lapisan Cu yang menempel di permukaan baja bersifat hidrofobik sehingga dapat

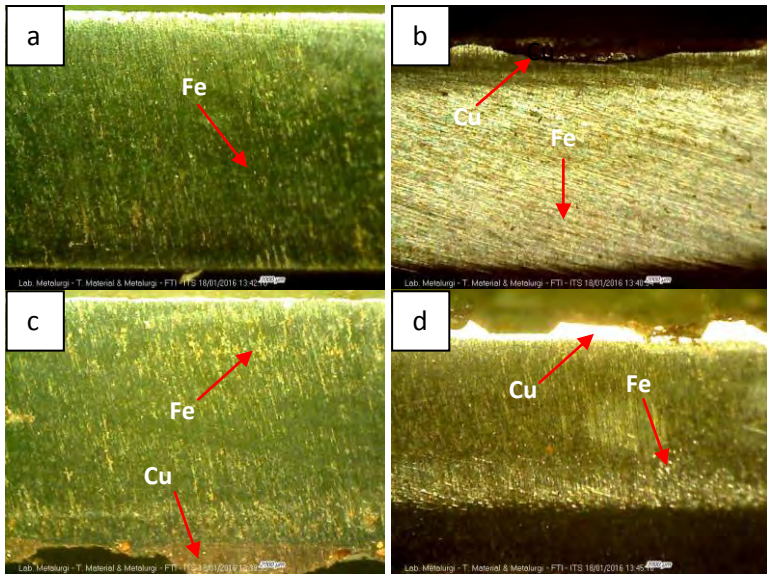
menaikkan *corrosion resistance* baja tersebut selagi lapisannya merata.



Gambar 4.2. Permukaan spesimen copperizing *pre-heat* 900°C *immerse time* (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x

Gambar 4.2 memperlihatkan penampakan fisik spesimen setelah dicopperizing. Spesimen dengan *pre-heat* 900°C (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit. Semua sampel terlihat membentuk lapisan Cu di permukaan, lapisan lebih merata ditunjukkan oleh spesimen (b) dan (c) sedangkan spesimen (d) masih terdapat beberapa rongga yang tidak tertutupi lapisan Cu. Sama halnya dengan yang telah dibahas sebelumnya bahwa lapisan Cu yang terdapat pada permukaan spesimen merupakan oksida Cu yang bersifat hidrofobik, semakin merata lapisan tersebut maka ketahanan korosinya akan meningkat

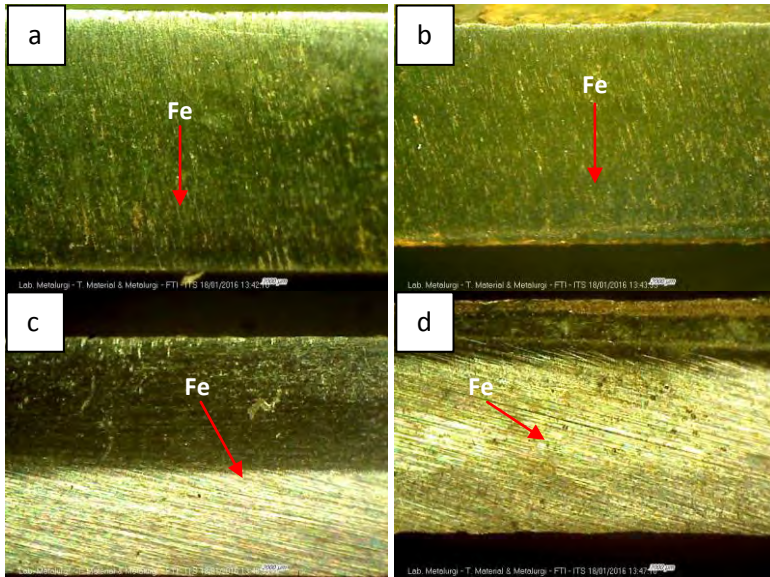
Berdasarkan Gambar 4.1 dan 4.2, sampel dengan *pre-heat* 800°C umumnya memiliki lapisan yang lebih renggang dan tidak teratur, sampel dengan *pre-heat* 900°C terlihat lebih merata dan rapat dibandingkan dengan sampel dengan *pre-heat* 800°C. Sementara itu apabila dibandingkan dengan sampel tanpa perlakuan, sampel tanpa perlakuan rata dan bersih dari deposit.



Gambar 4.3. Penampang lintang spesimen *pre-heat* 800°C (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x

Gambar 4.3. merupakan gambar penampang lintang spesimen untuk sampel *pre-heat* 800°C, sampel (b) 3 menit, (c) 5 menit, dan (d) 7 menit. Ketiga sampel memperlihatkan adanya Cu yang terletak di permukaan dan membentuk semacam lapisan serta tidak memperlihatkan Cu di bagian tengah, ketebalan lapisan yang terbentuk terlihat bervariasi, apabila dihubungkan

dengan hasil pengujian OES, ketiga sampel tersebut memang mengalami peningkatan kadar Cu yang cukup signifikan, meski demikian komposisi Cu yang terdifusi tidak terlalu besar sehingga secara makro tidak dapat terlihat .



Gambar 4.4. Penampang lintang spesimen *pre-heat* 900°C (a) Tanpa perlakuan (b) 3 menit (c) 5 menit (d) 7 menit perbesaran 8x

Gambar 4.4 merupakan gambar penampang lintang untuk spesimen untuk sampel *pre-heat* 900°C, sampel (b) 3 menit, (c) 5 menit, dan (d) 7 menit. Ketiga sampel tidak memperlihatkan adanya Cu begitupun dengan lapisan yang terbentuk, lapisan pada sampel-sampel tersebut lebih tipis bahkan ada yang tidak terlihat, sama halnya dengan *pre-heat* 800°C pada sampel-sampel ini juga tidak ada Cu yang terlihat .

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan melalui Gambar 4.1 hingga 4.4. keseluruhannya sangat berkaitan erat.

Sampel dengan pre-heat 800°C membentuk lapisan Cu yang lebih sedikit dan tidak merata jika dibandingkan dengan sampel-sampel dengan *pre-heat* 900°C. Dilihat pada penampang lintangnya seluruh sampel sama-sama tidak menunjukkan adanya Cu yang berdifusi, hal ini mengindikasikan terjadinya dua hal yakni Cu tidak ada yang berdifusi ke dalam Fe atau Cu memang dapat berdifusi ke dalam Fe akan tetapi jumlahnya sangat sedikit. Untuk meyakinkan pendapat tersebut, maka perlu dilakukan pengujian komposisi yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.1 sampai 4.3.

IV.2. Analisis Komposisi Unsur

Komposisi unsur seluruh sampel dideteksi dengan menggunakan instrument OES *Spectrometer*. Hasil Pengujian OES menunjukkan bahwa sampel kontrol memiliki kadar karbon 0.0358%, berdasarkan ASTM A830M specimen kontrol tersebut diklasifikasikan sebagai AISI 1006, sementara itu komposisi Cu tercatat 0.0375%, adapun data komposisi utama unsur disajikan dalam tabel 4.1.

Tabel 4.1. Komposisi unsur spesimen kontrol

Unsur	Komposisi (Ave.wt%)
Fe	99.5
C	0.0358
Si	0.02
Mn	0.210
Cu	0.0375
Ni	0.092

Analisis selanjutnya dilakukan terhadap sampel yang sudah dicopperizing dengan temperature *Pre-heat* 800°C tersaji pada Tabel 4.2. , data yang didapatkan dari pengujian menunjukkan tren kenaikan komposisi Cu di dalam baja seiring dengan penambahan waktu *immerse time* dengan pendinginan yang sama yaitu *rapid cooling*. Sample dengan waktu celup 3 menit

mempunyai kadar 0.958% Cu , sampel 5 menit 2.66% Cu , dan sampel 7 menit 3.150% Cu. Hal tersebut membuktikan adanya peningkatan kadar Cu di dalam baja seiring dengan *immerse time* yang semakin meningkat.

Tabel 4.2. Komposisi unsur spesimen *pre-heat* 800°C

Variabel	Komposisi Unsur (%)					
	Fe	C	Si	Cu	Mn	Ni
3'	96.3	0.240	0.181	0.958	0.286	<0.005
5'	94.6	0.322	0.264	2.660	0.198	0.0173
7'	93.5	0.412	0.024	3.510	0.200	0.0268

Berdasarkan analisis data yang dilakukan untuk sampel dengan *pre-heat* 900°C pada dan variasi *immerse time* pada Tabel 4.3. Pola yang sama juga diperlihatkan oleh ketiga sampel tersebut dimana waktu celup 3 menit mempunyai kadar 0.0964% Cu, sampel 5 menit 0.128% Cu, dan sampel 7 menit 0.277% Cu.

Tabel 4.3. Komposisi unsur spesimen *pre-heat* 900°C

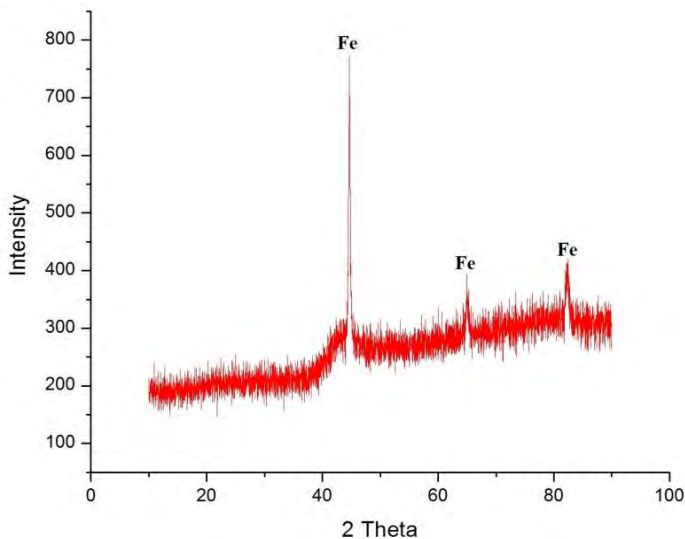
Variabel	Komposisi Unsur (%)					
	Fe	C	Si	Cu	Mn	Ni
3'	99.4	<1.25	0.0186	0.096	0.207	0.025
5'	99.3	0.0112	0.0573	0.128	0.175	0.069
7'	99.2	0.0607	0.0148	0.277	0.230	0.029

IV.3. Analisis Pengujian XRD

IV.3.1. Analisis Spesimen Kontrol

Berdasarkan Pengujian XRD yang telah dilakukan, specimen control tidak menunjukkan adanya peak Cu melainkan seluruhnya adalah Peak Fe- α , hal ini sesuai dengan data pengujian spektroskopi untuk sample control berupa baja 1006 yang mempunyai kadar karbon sangat kecil (0.0358%) sehingga C masih dapat larut di dalam Fe- α begitu pula dengan Cu yang

mungkin masih dapat larut ke dalamnya juga. Intensitas Fe tertinggi berada pada posisi $2\theta = 44.6563$ yaitu 487.49, adapun peak lainnya yang berada pada posisi 82.3476 dan 64.9553 mempunyai intensitas 73.89 dan 68.47. Adapun grafik pengujian XRD untuk specimen control disajikan dalam Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.5. Hasil pola pengujian XRD specimen control

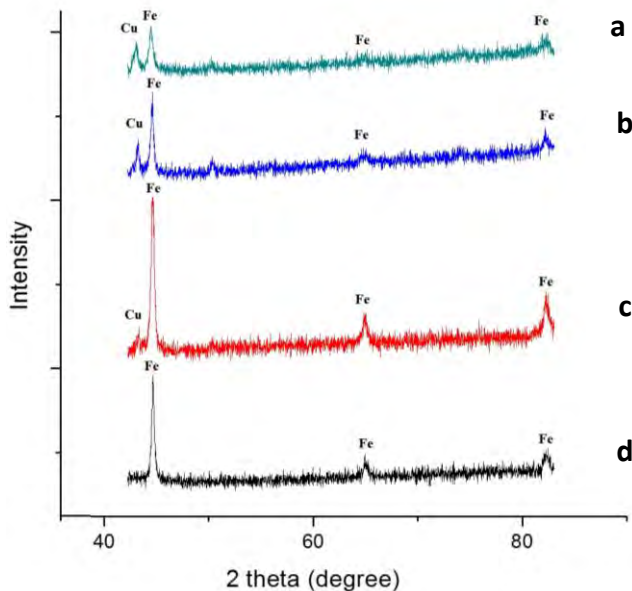
Tabel 4.4. Spesifikasi Peak Fe hasil pengujian XRD spesimen kontrol

2 θ	Intensity	Phase
44.6563	487.49	Fe- α
82.3476	73.89	Fe- α
64.9553	68.47	Fe- α

IV.3.2. Analisis Spesimen Pre-heat 800°C

Spesimen dengan variasi immerse time untuk *pre-heat* 800°C menunjukkan mulai adanya Peak milik Cu, berdasarkan diagram kesetimbangan fasanya, pada temperature kamar paduan

Fe-Cu akan membentuk struktur Fe dan Cu yang terpisah, Fe dan Cu sama-sama tidak membentuk senyawa intermetalik, hal tersebut diperkuat dengan data pengujian spektroskopi dimana sampel dengan *pre-heat* 800°C rata-rata mempunyai kadar Cu yang relative lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel *pre-heat* 900°C. Sampel 3 menit pencelupan, peak Cu terdapat pada intensity 83.64, sementara itu 5 menit pencelupan 139.28 dan 7 menit pencelupan Cu menempati peak dengan intensity 263.56, 50.4802 dan 74.2863 sedangkan selebihnya adalah peak milik Fe- α .



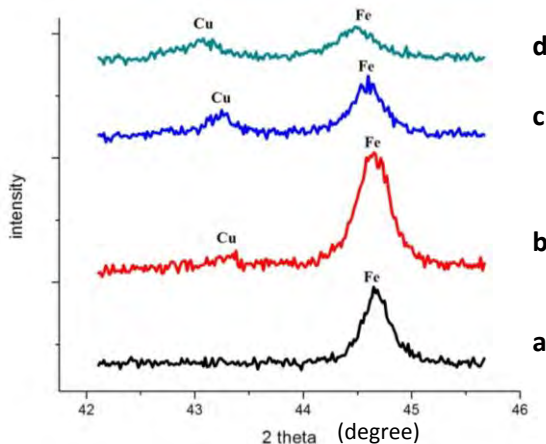
Gambar 4.6. Hasil pola XRD untuk sampel control dan pre-heat 800°C
(a) Sampel control (b) *Immerse time* 3' (c) *Immerse time* 5' (d) *Immerse time* 7'

Gambar 4.6 memperlihatkan pola peak Cu yang telah dijelaskan sebelumnya, ketiga peak tersebut menempati posisi 2θ

yang hampir sama namun memiliki intensitas yang berbeda, apabila dihubungkan dengan komposisi Cu yang didapat maka semakin banyak komposisi Cu maka semakin tinggi intensitasnya. Grafik (b) hanya menampilkan satu peak Cu saja, gambar (c) menampilkan satu peak Cu akan tetapi dengan intensitas yang lebih tinggi daripada (b), gambar (d) menampilkan lebih banyak peak Cu dengan peak tertingginya lebih tinggi daripada (b) dan (c).

Tabel 4.5. Spesifikasi Peak Cu tertinggi hasil pengujian XRD sampel pre-heat 800°C (TP = Tanpa Perlakuan)

Sampel	2 θ	Intensity
TP	-	-
3'	43.269	83.64
5'	43.276	149.96
7'	43.095	122.74



Gambar 4.7. perbandingan peak tertinggi (Fe- α) dan Cu sampel pre-heat 800°C (a) Spesimen kontrol (b) *immerse* 3' (c) *immerse* 5' (d) *immerse* 7'

Gambar 4.7. lebih focus memperlihatkan perubahan peak Fe untuk masing-masing specimen. Intensitas peak Fe semakin menurun seiring dengan lamanya waktu *immerse*. Adapun kemungkinan terjadinya *broadening peak* baru terlihat setelah mendapatkan data FWHM dan microstrain dari masing-masing peak.

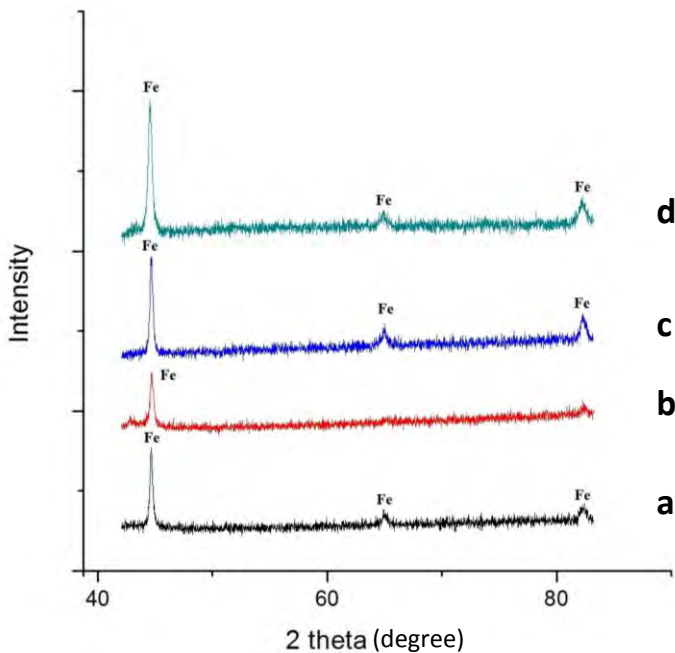
Tabel 4.6. spesifikasi peak Fe tertinggi sampel pre-heat 800°C
(TP = Tanpa Perlakuan)

Sampel	2θ	FWHM (°)	B[$\times 10^{-4}$]	$\epsilon[\times 10^{-4}]$
TP	44.6563	0.0836	3.517	2.17
3'	44.5933	0.1224	15.20	9.20
5'	44.5896	0.2342	38.02	23.24
7'	44.4871	0.3011	50.36	30.78

Data FWHM pada Tabel 4.6 digunakan untuk menentukan besarnya *microstrain* yang terjadi akibat adanya Cu yang terlarut. Kecenderungan di atas menunjukkan bahwa Cu yang larut di Fe semakin banyak, adapun intensitas Fe semakin menurun.

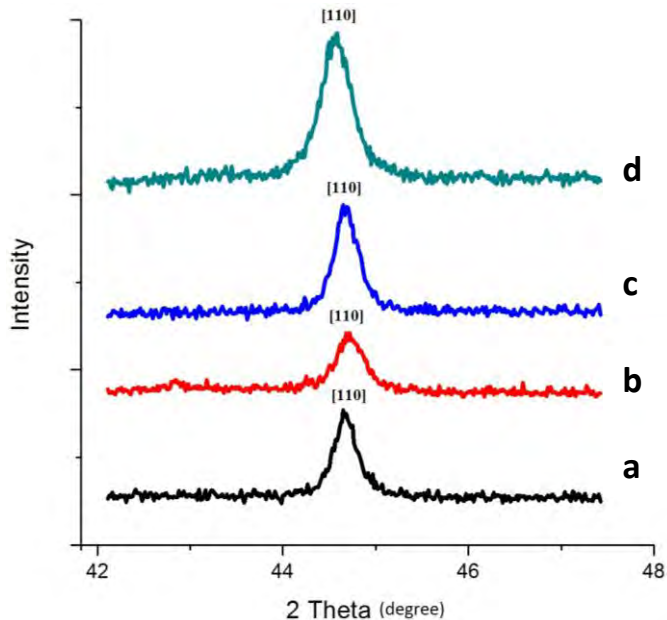
Gambar 4.7 juga memperjelas terdapat Peak Cu yang muncul akibat penambahan Cu. Dari gambar tersebut Cu mulai muncul pada Grafik (b) dan seiring dengan pertambahan waktu *immerse time* peak Cu semakin meninggi, jika dikorelasikan dengan hasil pengujian spektroskopi pada Tabel 4.2 munculnya peak tersebut adalah akibat penambahan Cu yang melebihi batas kelarutan Cu di dalam Fe- α sehingga Cu akan keluar dari butir Fe. Berdasarkan diagram kesetimbangan pada Gambar 2.12. terlihat bahwa Cu yang keluar akan berdiri sendiri sebagai Cu berstruktur FCC. Menurut Husna (2007) pembentukan puncak fasa baru dapat terjadi akibat rejeksi dari larutan padat tertentu yang melebihi kemampuan larut-padatnya dalam suatu struktur fasa.

IV.3.3. Analisis Spesimen Pre-heat 900°C



Gambar 4.8. Hasil pola XRD sampel *pre-heat* 900°C (a) tanpa perlakuan (b) *immerse* 3' (c) *immerse* 5' (d) *immerse* 7'

Gambar 4.8. Spesimen dengan variasi *immerse* time untuk *pre-heat* 900°C tidak ada yang menunjukkan peak milik Cu melainkan hanya peak Fe- α saja, hal ini bisa saja terjadi apabila Cu yang terdapat pada baja tersebut sangat kecil sehingga masih dapat larut di dalam Fe- α . Untuk memperlihatkan perbedaan peak tertinggi Fe pada Gambar 4.8 maka peak Fe tersebut diperbesar pada Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.9. perbandingan peak tertinggi (Fe- α) sampel *pre-heat* 900°C (a) tanpa perlakuan (b) *immerse* 3' (c) *immerse* 5' (d) *immerse* 7'

Gambar 4.9. menunjukkan analisis terhadap peak tertinggi yang terdapat pada $2\theta=44.656$. Apabila melihat keempat grafik tersebut terlihat bahwa peak Fe semakin melebar dan intensitasnya meningkat seiring dengan pertambahan waktu *immerse*, adapun pelebaran peak secara kuantitatif ditunjukkan oleh data FWHM (*Full width height maximum*).

Tabel 4.7. spesifikasi peak Fe tertinggi sampel pre-heat 900°C (TP=Tanpa perlakuan)

Sampel	2 θ	Intensity	FWHM (°)
TP	44.6563	487.49	0.0836
3'	44.8921	267.17	0.1004
5'	44.6594	585.40	0.2342
7'	44.5449	775.32	0.2676

Berdasarkan data pada Tabel 4.7 FWHM untuk masing-masing sampel menunjukkan peningkatan, artinya terjadi mekanisme *broadening peak* pada sampel tersebut. Apabila dihubungkan dengan hasil pengujian spektroskopi yang menunjukkan lama waktu pencelupan berbanding lurus dengan penambahan komposisi Cu. Dapat disimpulkan dari gambar bahwa semakin banyak Cu yang masuk ke Fe menyebabkan peaknya melebar diikuti dengan intensitas yang meningkat.

Data FWHM masing-masing specimen berguna untuk menghitung besarnya regangan pada system kristal yang terjadi akibat adanya Cu yang terlarut. FWHM standar yang digunakan adalah 0.086, dengan menggunakan hubungan antara FWHM dan Strain, maka nilai strain (ϵ) dapat diketahui.

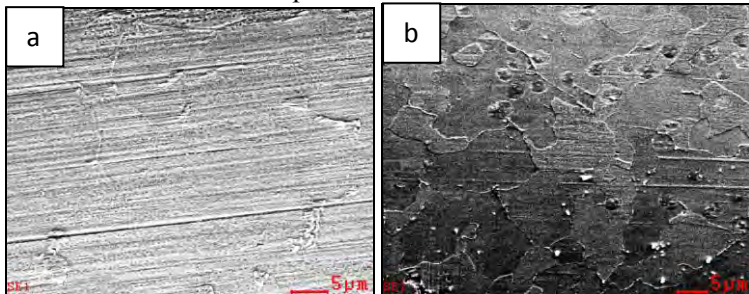
Tabel 4.8. ukuran kristal Fe untuk masing-masing perlakuan (TP= Tanpa Perlakuan)

Sampel	FWHM (°)	B [$\times 10^{-4}$]	ϵ [$\times 10^{-4}$]
TP	0.0836	3.517	2.174
3'	0.1004	9.04	5.471
5'	0.2342	38.02	23.18
7'	0.2676	44.22	25.07

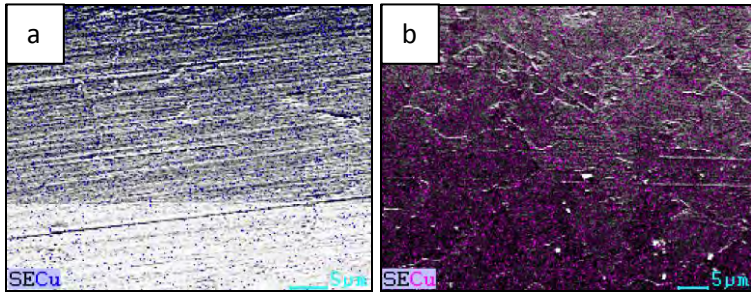
Data nilai regangan mikro (*microstrain*) pada Tabel 4.8 menunjukkan bahwa semakin lama *immerse time* maka broadening peak dan regangannya semakin meningkat, peningkatan *broadening peak* ini terjadi akibat ada unsur tertentu yang terlarut di dalam fasa Fe- α peningkatan regangan ini terjadi karena ada Cu yang mensubstitusi ke dalam system kristal Fe, oleh karena regangan adalah fungsi terhadap pertambahan panjang rusuk kristal, maka penambahan Cu menyebabkan rusuknya bertambah panjang, hal ini sesuai dengan data diameter atom Cu yang sedikit lebih besar daripada diameter atom Fe.

IV.4 Analisis SEM

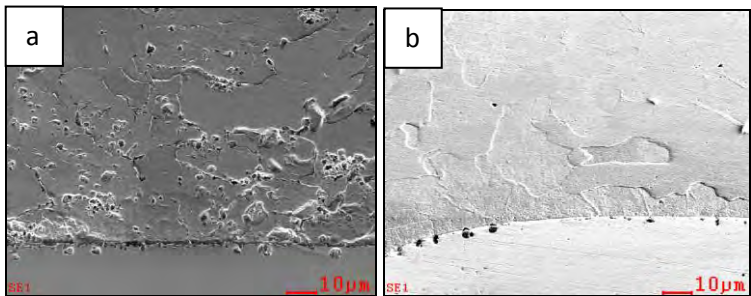
Hasil mapping menggambarkan pola persebaran Cu pada sampel, Cu terbanyak berada pada bagian tepi sampel dan semakin sedikit menuju tengah, persebaran Cu relative sama atau merata baik di butir maupun di batas butir.



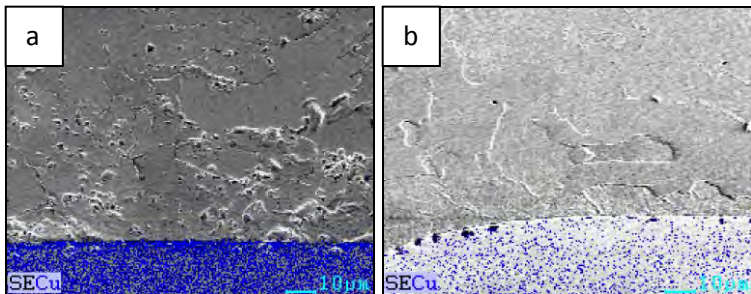
Gambar 4.10. Mikrografi SEM sampel (a) 800.3' (b) 900.3' bagian tepi (1000x)



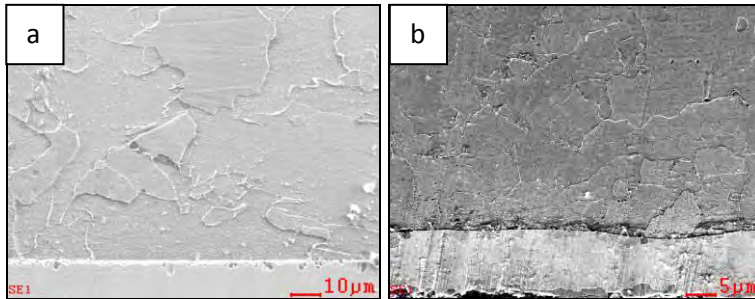
Gambar 4.11. Mapping mikrografi SEM sampel (a) 800.3' (b) 900.3' bagian tepi (1000x)



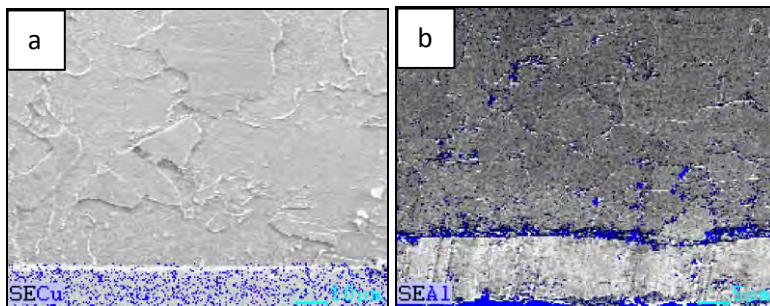
Gambar 4.12 Mikrografi SEM sampel (a) 800.5' (b) 900.5' bagian tepi (1000x)



Gambar 4.13. Mapping mikrografi SEM (a) sampel 800.5' (b) 900.5' bagian tepi (1000x)

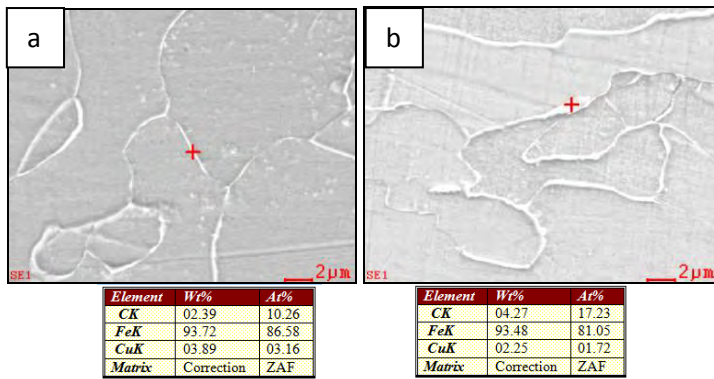


Gambar 4.14 Mikrografi SEM sampel (a) 800.7' (b) 900.7' tepi (1000x)



Gambar 4.15. Mapping mikrografi SEM (a) sampel 800.7' (b) 900.7' bagian tepi (1000x)

Apabila dikorelasikan dengan hasil pengujian OES, maka Gambar 4.11 sampai 4.15 telah memperkuat bukti bahwa Cu mampu perdifusi ke dalam Fe meskipun persebarannya masih belum membentuk pola apakah di dalam butir ataupun di batas butir. Selanjutnya dilakukan pengamatan terhadap bagian batas butir dengan perbesaran 5000x untuk memastikan ada atau tidaknya Cu yang terdapat di batas butir. Berdasarkan pengamatan terbukti ada sejumlah Cu di batas butir. Gambar hanya diambil pada spesimen dengan waktu celup 7 menit sebagai komposisi optimum Cu pada masing-masing temperatur *pre-heat*.

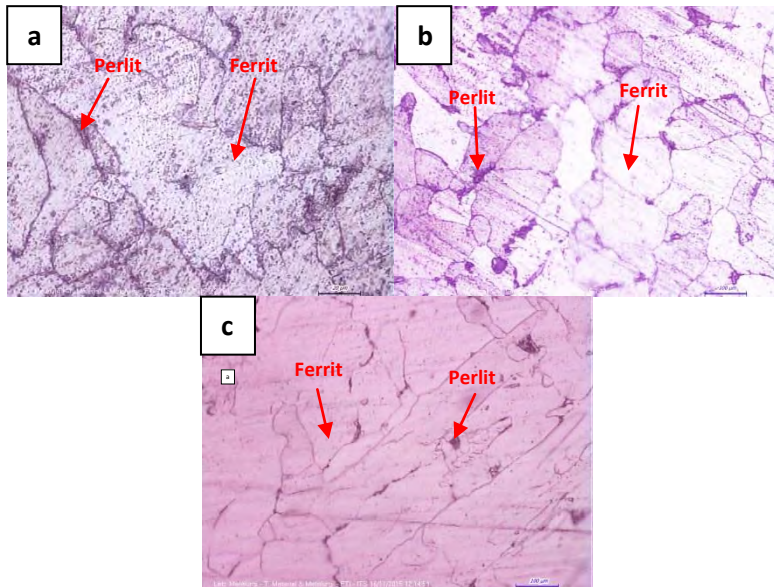


Gambar 4.16 Mikrografi SEM sampel (a) 800.7' (b) 900.7' perbesaran 5000x

Hasil EDX pada gambar 4.14 menggambarkan bahwa Cu yang berdifusi juga ada yang mengumpul di batas butir. Sampel dengan *pre-heat* 800°C memiliki kadar Cu lebih tinggi pada bagian batas butirnya dibandingkan dengan sampel dengan *pre-heat* 900°C. Hal tersebut sesuai dengan pengujian spektroskopi, selain itu apabila dikorelasikan dengan pengujian XRD, peak Cu yang terbentuk pada sampel *pre-heat* 800°C merupakan peak untuk daerah batas butir.

IV.5. Analisis Struktur Mikro

Analisis Struktur mikro menggunakan mikroskop optic OLYMPUS BX51M-RF dilakukan pada bagian *cross-section area* baja yang dicopperizing, analisis ini digunakan untuk mengetahui pengaruh waktu pencelupan terhadap ukuran butir. Pada gambar Struktur mikro terlihat bahwa ferit sangat mendominasi, akan tetapi apabila dilihat dari ukurannya akan terlihat beberapa perbedaan yang cukup signifikan.



Gambar 4.17. Gambar Struktur mikro *Copperized 900°C* pendinginan udara dengan *Immerse time* (a) 3 menit (b) 5 menit (c) 7 menit 500x menggunakan etsa Nital

Gambar 4.17 menggambarkan hasil metalografi dari ketiga sampel. (a) butiran terlihat sangat besar sehingga batas butir sangat sedikit (b) butiran terlihat semakin mengecil dengan batas butir lebih banyak (c) butiran semakin mengecil dibandingkan dua specimen sebelumnya dengan batas butir yang banyak.

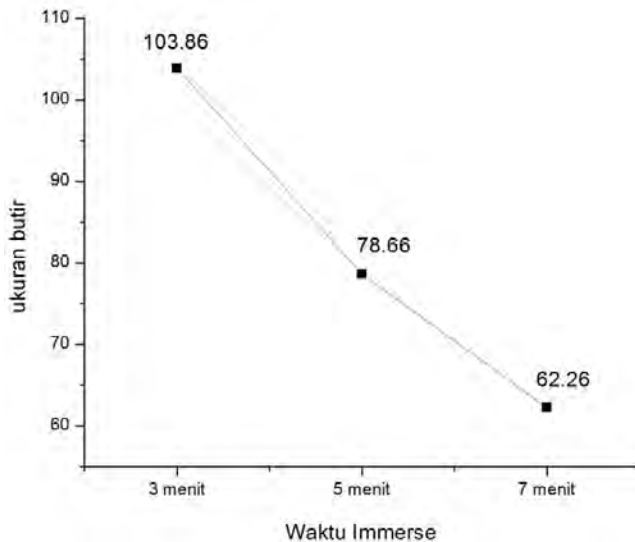
Butir yang mengecil tersebut merupakan butir milik ferit karena perlit terlihat sangat sedikit sekali serta terkonsentrasi hanya pada beberapa bagian batas butir saja, hal tersebut membuktikan bahwa baja yang digunakan sebagai specimen adalah benar ultra low carbon steel, selain itu hal yang lebih penting adalah waktu immersing time pada proses copperizing dapat mempengaruhi ukuran butir. Berdasarkan analisis menggunakan perhitungan metode *Heyn-Intercept* dan

mencocokkannya dengan ASTM E-112 maka didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 4.9. Data ukuran butir dengan variasi *immerse time*, dengan *pre-heat* 900°C

	3 menit	5 menit	7 menit
Ukuran (μm^2)	103.86	78.66	62.26

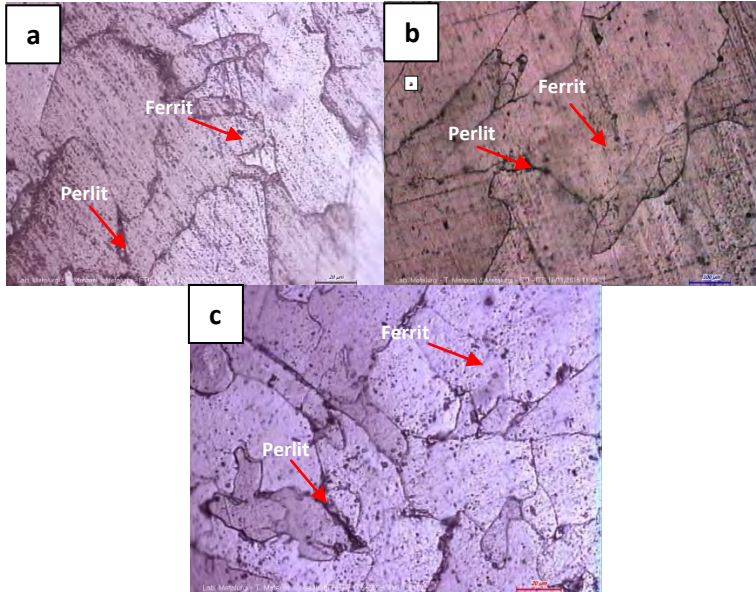
Apabila diplot dalam bentuk grafik garis, maka data kecenderungan penyempitan ukuran butir akan tersaji sebagai berikut:



Gambar 4.18. grafik perubahan ukuran butir *copperizing pre-heat* 900°C

Analisis struktur mikro juga dilakukan pada specimen dengan *pre-heat* 800°C, kecenderungan yang sama juga terjadi pada variasi immerse timenya yaitu semakin lama waktu immerse

maka ukuran butir akan semakin mengecil. Untuk mengidentifikasi besarnya ukuran butir juga menggunakan metode perhitungan yang sama yakni metode Heyn-Intercept. Adapun foto hasil pengamatan struktur mikro tersaji dalam data berikut:



Gambar 4.19. Struktur mikro *Copperized* 800°C-pendinginan udara dengan *Immerse time* (a) 3 menit (b) 5 menit (c) 7 menit 500x menggunakan etsa Nital

Gambar 4.19 menggambarkan hasil metalografi dari ketiga sampel. (a) butiran terlihat sangat besar sehingga batas butir sangat sedikit (b) butiran terlihat semakin mengecil dengan batas butir lebih banyak (c) butiran semakin mengecil dibandingkan dua specimen sebelumnya dengan batas butir yang banyak.

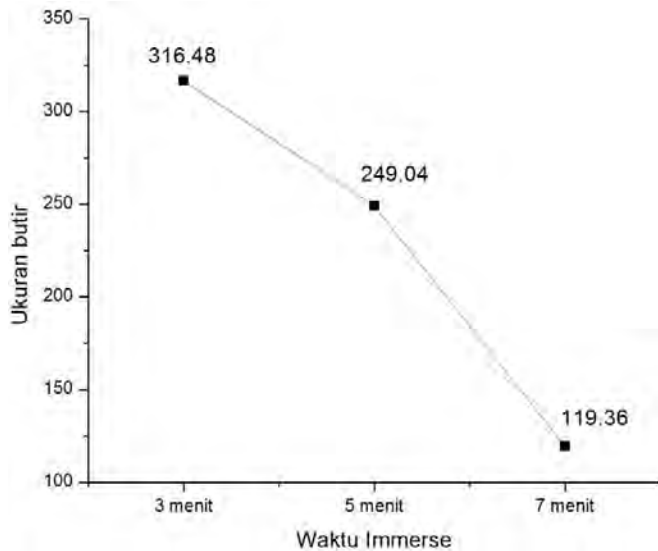
Berdasarkan analisis menggunakan perhitungan metode

Heyn-Intercept dan mencocokkannya dengan ASTM E-112 maka didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 4.10. Data ukuran butir dengan variasi *immerse time*, dengan *pre-heat* 800°C

	3 menit	5 menit	7 menit
Ukuran (μm^2)	316.84	249.04	119.36

Apabila diplot dalam bentuk grafik garis, maka data kecenderungan penyempitan ukuran butir akan tersaji sebagai berikut:



Gambar 4.20. Grafik perubahan ukuran butir *copperizing pre-heat* 800°C

Apabila data metalografi tersebut dihubungkan dengan data pengujian spektroskopi maka semakin banyak Cu yang berdifusi ke dalam Fe menyebabkan butiran ferrit pada Fe akan semakin

kecil. Menurut ASM Handbook (1990) Cu yang terlarut di dalam Fe dapat mengecilkan ukuran butir, bahkan penambahannya dalam kadar tertentu dapat menurunkan ukuran butir dengan ekstrim oleh karena itulah Cu sering disebut juga dengan *ultra grain refinement agent* pada baja. Ruddle (2002) juga menyatakan bahwa pengecilan ukuran butir Ferrite karena penambahan Cu terjadi akibat adanya Cu yang menghambat rekristalisasi austenite dan menghambat transformasi austenite ke ferrite.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil analisis data dan pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

- Metode *Copperizing* meninggalkan lapisan Cu pada permukaan spesimen dengan lapisan yang paling sedikit terbentuk pada spesimen dengan *pre-heat* 800°C.
- Peningkatan komposisi Cu optimum terjadi pada sampel dengan *pre-heat* 800°C.
- Fasa Cu (FCC) terbentuk pada sampel *pre-heat* 800°C sedangkan Cu pada sampel dengan *pre-heat* 900°C seluruhnya larut dalam Fe- α .
- Penambahan komposisi Cu dapat memperkecil ukuran butir.
- Cu yang berdifusi ke dalam AISI 1006 lebih banyak terkonsentrasi pada bagian tepi dan semakin berkurang di posisi tengah.

1.2 Saran

Untuk melakukan penelitian selanjutnya terkait metode *copperizing*, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah:

- Waktu pengambilan spesimen tidak boleh terlalu lama karena hal tersebut dapat menambah kemungkinan terbentuknya oksida Cu.
- *Crucible* yang digunakan untuk proses *copperizing* sebaiknya dicoating dengan zirconia terlebih dahulu untuk mencegah grafit bereaksi dengan Cu.
- Massa tembaga harus diperkirakan dengan benar untuk mencegah tembaga tumpah.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil pengujian komposisi OES

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	1	Material :	CARBON STEEL
Customer :	ADHA ISORI HARTATA	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M.THORIQ WAHYUDI
Date:	3/31/2015		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.5	0.0376	0.0205	0.211	0.0094	0.0089	0.0304	< 0.0050
2	99.5	0.0373	0.0199	0.208	0.0092	0.0079	0.0253	< 0.0050
3	99.5	0.0324	0.0195	0.211	0.0086	0.0072	0.0270	< 0.0050
Ave	99.5	0.0358	0.0200	0.210	0.0091	0.0080	0.0276	< 0.0050

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0305	0.0464	< 0.0050	0.0363	0.0103	0.0066	< 0.0050	< 0.0050
2	0.0308	0.0449	< 0.0050	0.0377	0.0122	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
3	0.0284	0.0450	< 0.0050	0.0384	0.0198	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
Ave	0.0292	0.0454	< 0.0050	0.0375	0.0140	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050

	Pb
1	< 0.0050
2	< 0.0050
3	< 0.0050
Ave	< 0.0050

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 3N Material :
Customer : Dimension :
Lab-no. : Heat-no. :
Operator : Ka. Laboratorium :
Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.4	< 1.25	0.0213	0.209	0.0130	0.0098	0.0276	0.0036
2	99.4	< 1.25	0.0196	0.207	0.0158	0.0074	0.0273	0.0057
3	99.5	< 1.25	0.0150	0.204	0.0116	0.0071	0.0267	0.0035
Ave	99.4	< 1.25	0.0186	0.207	0.0135	0.0081	0.0272	0.0042
	Ni	Cu						
1	0.0247	0.120						
2	0.0271	0.0956						
3	0.0224	0.0734						
Ave	0.0247	0.0964						

Sampel 900.3'

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : NORMALIZING Material : CARBON STEEL
 Customer : Sdr. TIO (TEKNIK MATERIAL & MDimension :)
 Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. :
 Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI
 Date: 9/14/2015

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.3	0.0098	0.0591	0.174	0.0406	0.0326	0.0320	0.0072
2	99.4	0.0082	0.0422	0.176	0.0316	0.0236	0.0286	0.0063
3	99.2	0.0117	0.0664	0.170	0.0329	0.0281	0.0382	0.0090
4	99.3	0.0126	0.0646	0.173	0.0318	0.0253	0.0336	0.0093
Ave	99.3	0.0112	0.0573	0.175	0.0335	0.0268	0.0334	0.0081
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0697	0.0405	0.0016	0.157	0.0017	0.0247	0.0015	0.0094
2	0.0559	0.0395	0.0015	0.115	0.0090	0.0159	0.0017	0.0142
3	0.0810	0.0443	0.0016	0.136	< 0.0010	0.119	< 0.0010	0.0189
4	0.0740	0.0425	0.0013	0.122	< 0.0010	0.0755	< 0.0010	0.0036
Ave	0.0697	0.0417	0.0015	0.128	0.0021	0.0615	0.0012	0.0101
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	0.0018	0.0040	< 0.0001	0.0017	0.0041	< 0.0001	0.0038	< 0.0005
2	0.0018	0.0028	< 0.0001	0.0012	0.0040	< 0.0001	0.0011	< 0.0005
3	0.0081	0.0028	< 0.0001	0.0021	0.0044	< 0.0001	0.0039	0.0008
4	0.0031	0.0027	< 0.0001	0.0017	0.0035	< 0.0001	0.0043	< 0.0005
Ave	0.0037	0.0030	< 0.0001	0.0016	0.0040	< 0.0001	0.0031	< 0.0005
	N	Se	Sb	Ta				
1	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
2	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
3	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
4	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
Ave	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				

Sampel 900.5'

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 7N Material :
 Customer : Dimension :
 Lab-no. : Heat-no. :
 Operator : Ka. Laboratorium :
 Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.1	0.0573	0.0151	0.223	0.0191	0.0088	0.0313	0.0036
2	99.2	0.0632	0.0153	0.228	0.0183	0.0091	0.0311	0.0036
3	99.2	0.0616	0.0141	0.239	0.0173	0.0090	0.0317	0.0056
Ave	99.2	0.0607	0.0148	0.230	0.0182	0.0090	0.0314	0.0043

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0297	0.0408	< 0.0005	0.347	0.0138	0.0012	0.0028	0.0036
2	0.0289	0.0424	0.0005	0.282	0.0040	0.0020	0.0025	0.0146
3	0.0290	0.0432	< 0.0005	0.201	0.0123	< 0.0010	0.0046	0.0159
Ave	0.0292	0.0421	< 0.0005	0.277	0.0100	0.0011	0.0033	0.0114

	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	0.0020	0.0016	< 0.0001	0.0008	0.0079	0.0006	0.0023	0.0011
2	0.0025	< 0.0005	< 0.0001	0.0007	0.0089	0.0009	0.0037	0.0045
3	0.0022	0.0017	0.0003	0.0007	0.0099	0.0011	0.0035	0.0035
Ave	0.0023	0.0013	0.0001	0.0008	0.0089	0.0009	0.0032	0.0030

	N	Se	Sb	Ta
1	< 0.0030	< 0.0010	0.0022	0.0089
2	< 0.0030	< 0.0010	0.0059	0.0089
3	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	0.0082
Ave	< 0.0030	< 0.0010	0.0027	0.0087

Sampel 900.7'

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 800 3N

Material :

Customer :

Dimension :

Lab-no. :

Heat-no. :

Operator :

Ka. Laboratorium :

Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER

Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	96.6	0.231	0.234	0.309	0.185	> 0.120	0.0360	< 0.0050
2	96.5	0.259	0.154	0.284	0.127	> 0.120	0.0378	< 0.0050
3	95.8	0.231	0.153	0.264	0.161	> 0.120	0.0356	0.0057
Ave	96.3	0.240	0.181	0.286	0.158	> 0.120	0.0365	< 0.0050
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	< 0.0050	0.0339	< 0.0050	0.922	0.0142	< 0.0050	< 0.0050	0.895
2	< 0.0050	0.0320	< 0.0050	0.924	0.0274	< 0.0050	0.0098	1.06
3	0.0080	0.0282	< 0.0050	1.02	0.0086	< 0.0050	< 0.0050	1.54
Ave	< 0.0050	0.0314	< 0.0050	0.958	0.0167	< 0.0050	< 0.0050	1.16
	Pb							
1	> 0.150							
2	> 0.150							
3	> 0.150							
Ave	> 0.150							

Sampel 800.3'

OES Chemical Results

Sample ID : 800 5

Material :

Customer :

Dimension :

Lab-no. :

Heat-no. :

Operator :

Ka. Laboratorium :

Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	94.2	0.333	0.268	0.240	0.187	> 0.120	0.0365	0.0174
2	94.6	0.307	0.320	0.175	0.133	> 0.120	0.0251	0.0363
3	95.1	0.325	0.204	0.178	0.130	> 0.120	0.0175	0.0283
Ave	94.6	0.322	0.264	0.198	0.150	> 0.120	0.0264	0.0273

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0154	0.0417	< 0.0050	3.25	0.0207	0.0074	0.0097	0.604
2	0.0164	0.0264	< 0.0050	2.41	0.0355	0.0110	< 0.0050	1.36
3	0.0200	0.0247	< 0.0050	2.31	0.0221	0.0055	0.0145	1.09
Ave	0.0173	0.0309	< 0.0050	2.66	0.0261	0.0079	0.0083	1.02

	Pb
1	> 0.150
2	> 0.150
3	> 0.150
Ave	> 0.150

Sampel 800.5'

LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 800 7 Material :
 Customer : Dimension :
 Lab-no. : Heat-no. :
 Operator : Ka. Laboratorium :
 Date :

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	92.6	0.413	0.0261	0.201	0.0122	0.0111	0.0223	0.0072
2	93.8	0.410	0.0206	0.195	0.0121	0.0097	0.0241	0.0080
3	94.1	0.413	0.0240	0.204	0.0125	0.0110	0.0233	0.0065
Ave	93.5	0.412	0.0236	0.200	0.0123	0.0106	0.0232	0.0072

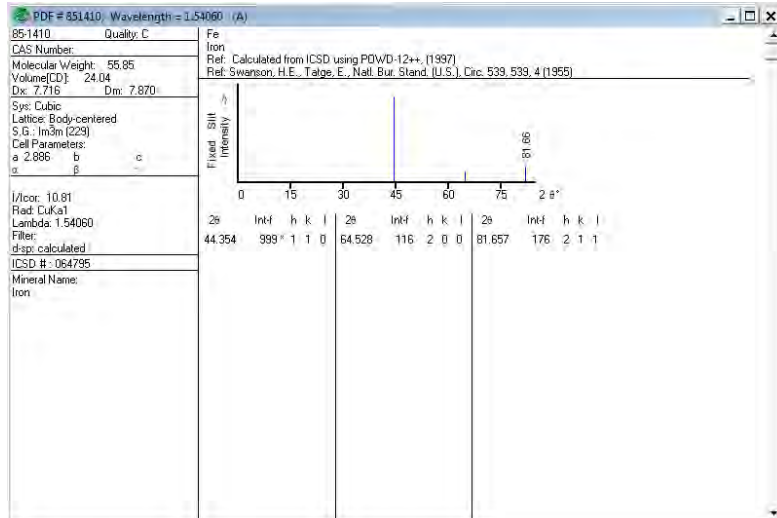
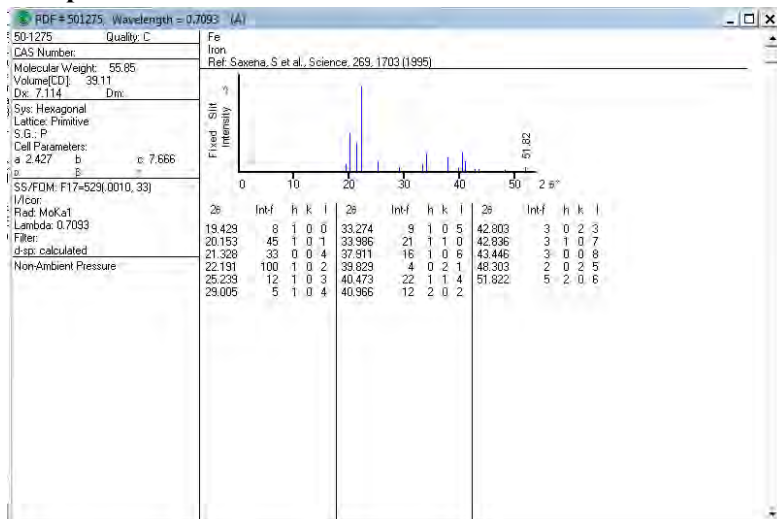
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0282	0.0518	< 0.0050	3.44	0.0053	< 0.0050	< 0.0050	0.0149
2	0.0264	0.0528	< 0.0050	3.62	0.0064	< 0.0050	< 0.0050	0.0215
3	0.0257	0.0541	< 0.0050	3.47	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	0.0113
Ave	0.0268	0.0529	< 0.0050	3.51	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	0.0159

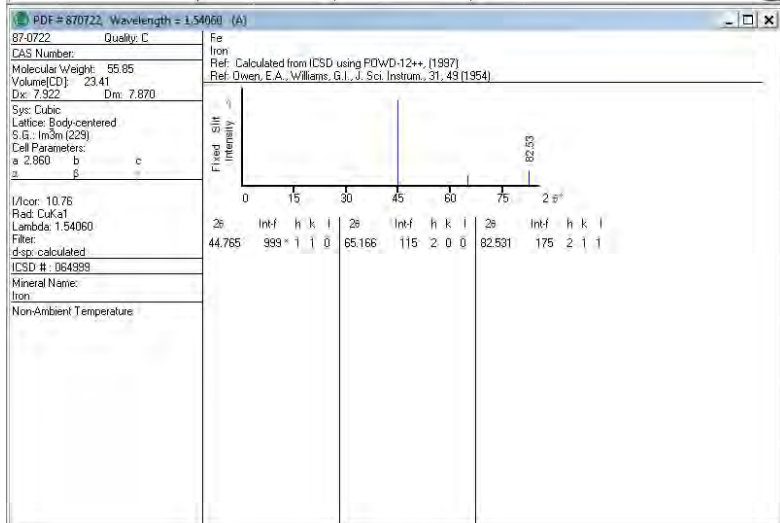
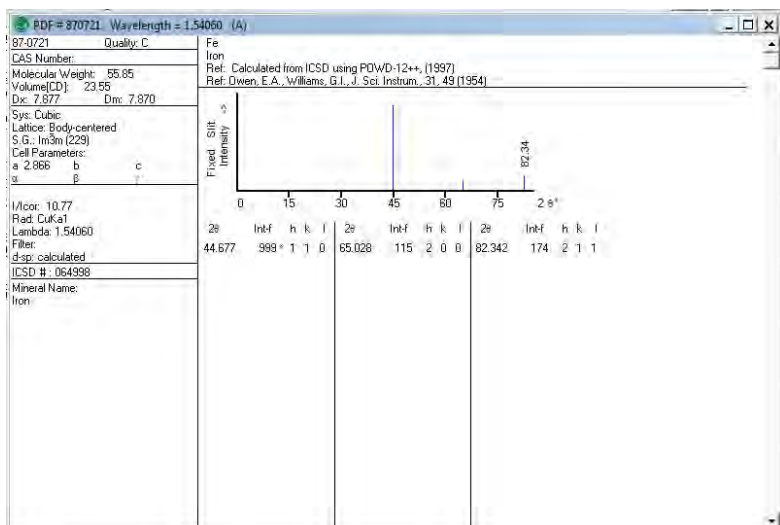
	Pb
1	0.0079
2	0.0078
3	0.0071
Ave	0.0076

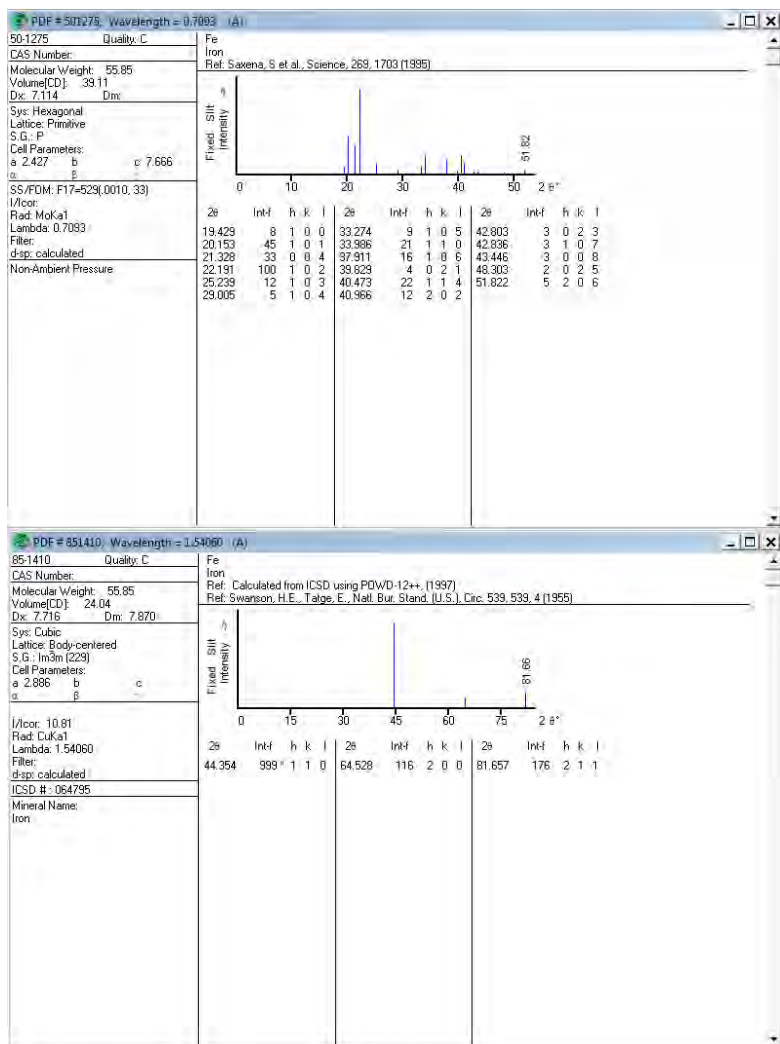
Kampus ITS Sukolilo
 II Teknik Kimia

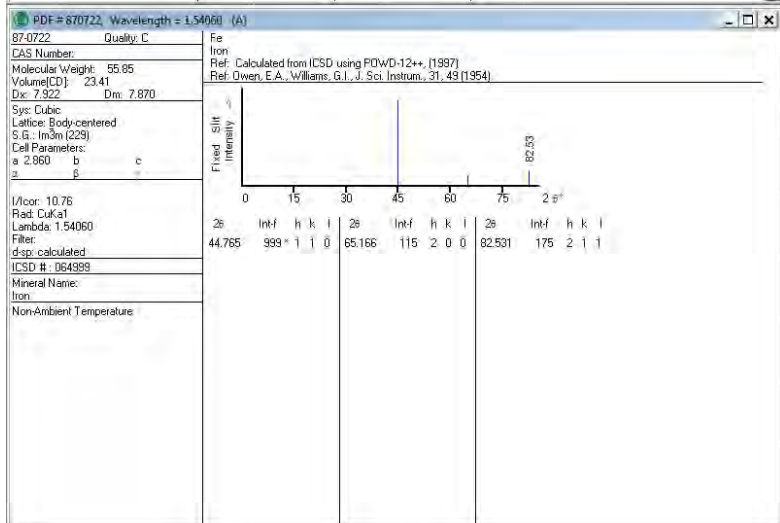
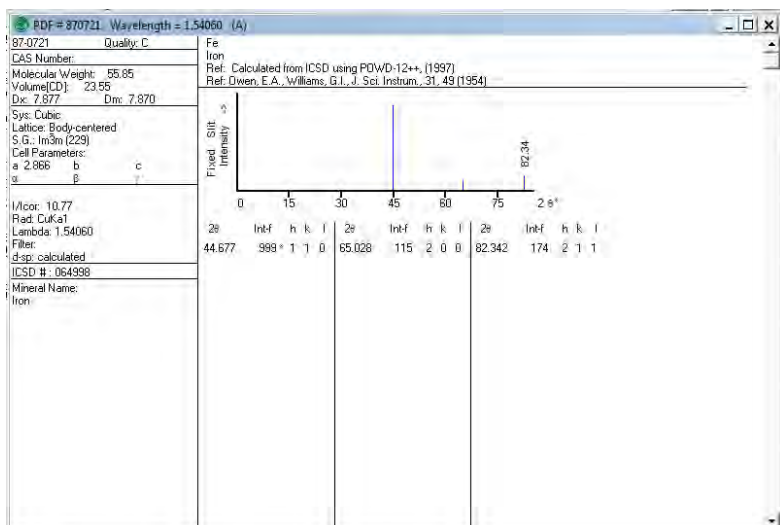
Sampel 800.7

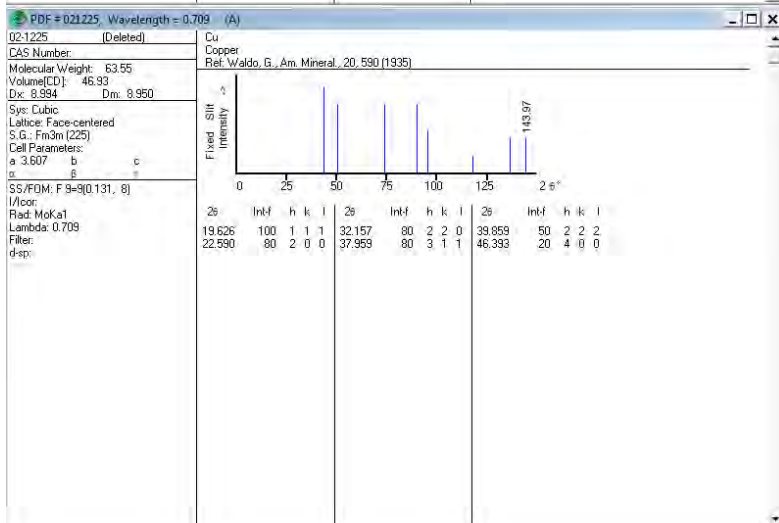
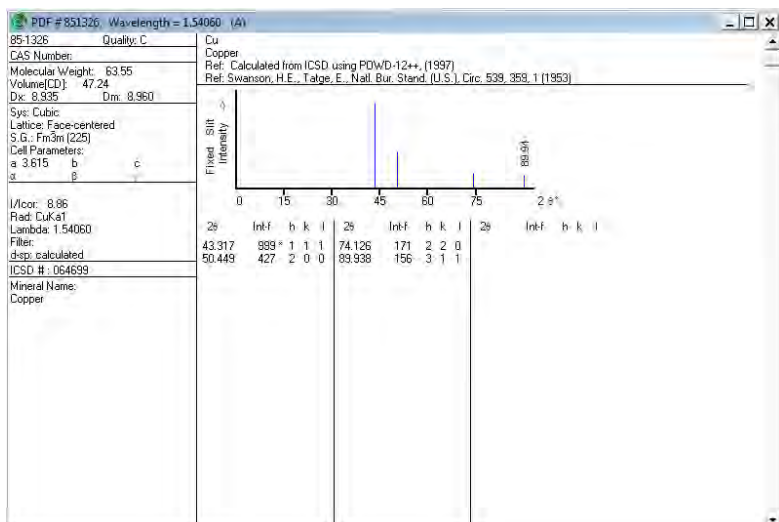
Lampiran 2 JCPDS Card

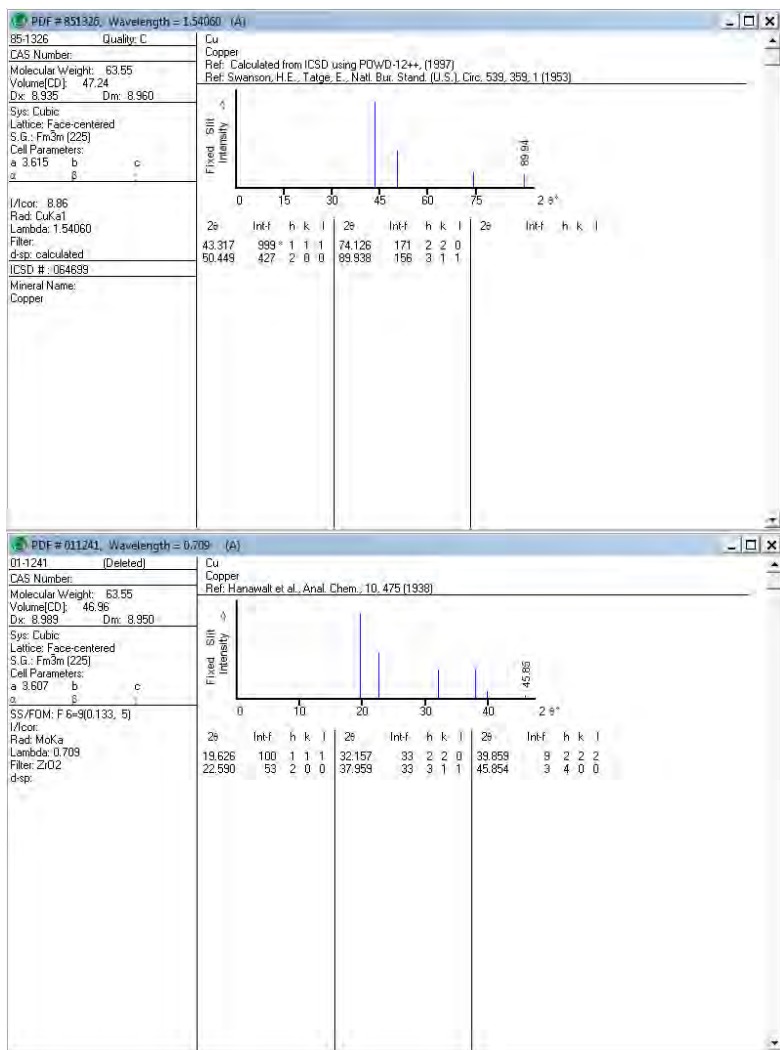


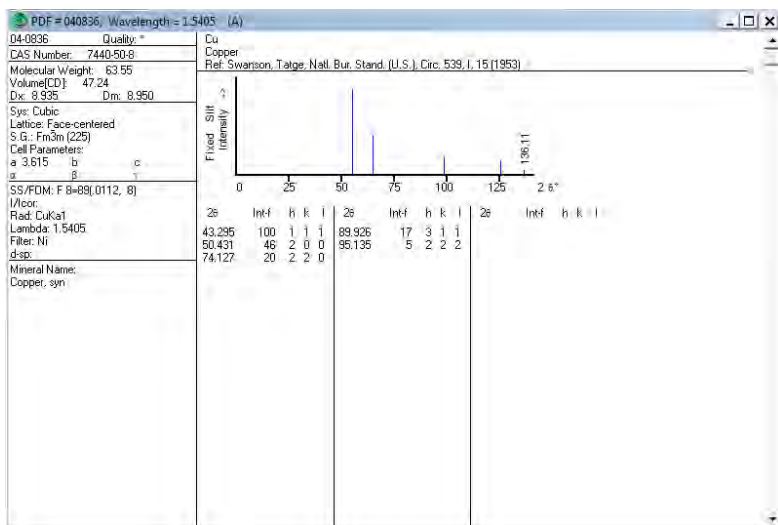




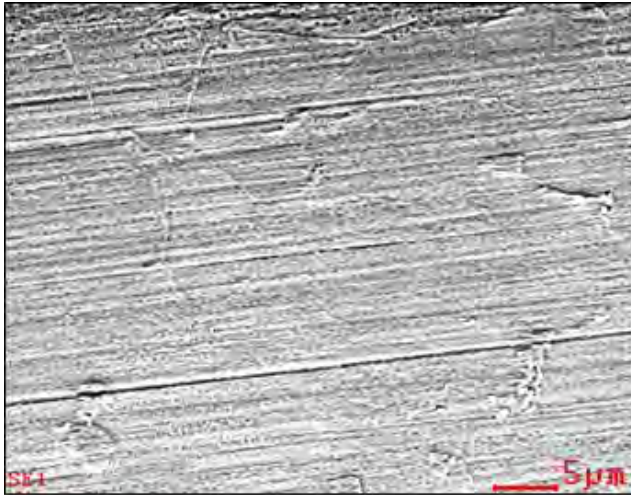




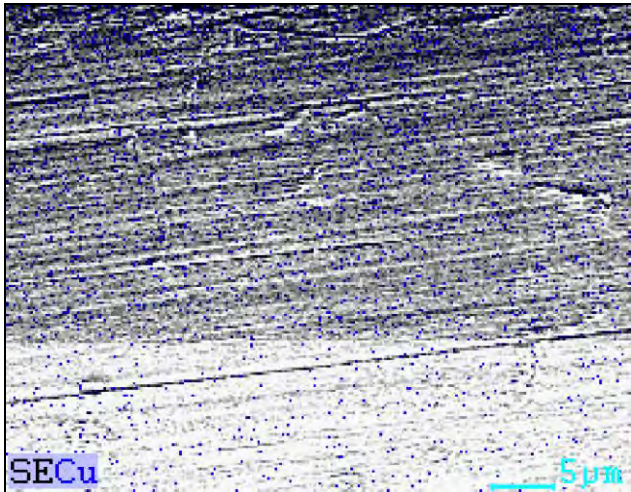




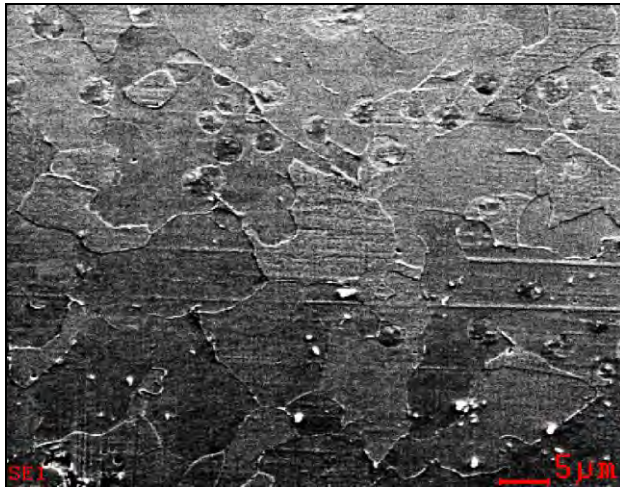
Lampiran 3 Hasil Pengujian SEM/EDX



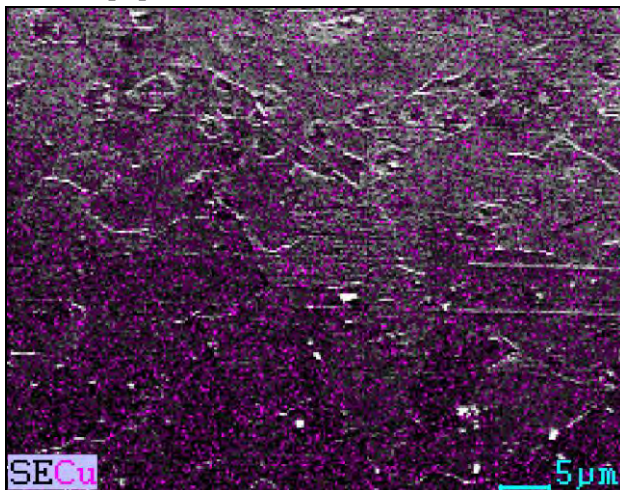
800.3' tepi perbesaran 1000x



800.3' *mapping* bagian tepi perbesaran 1000x

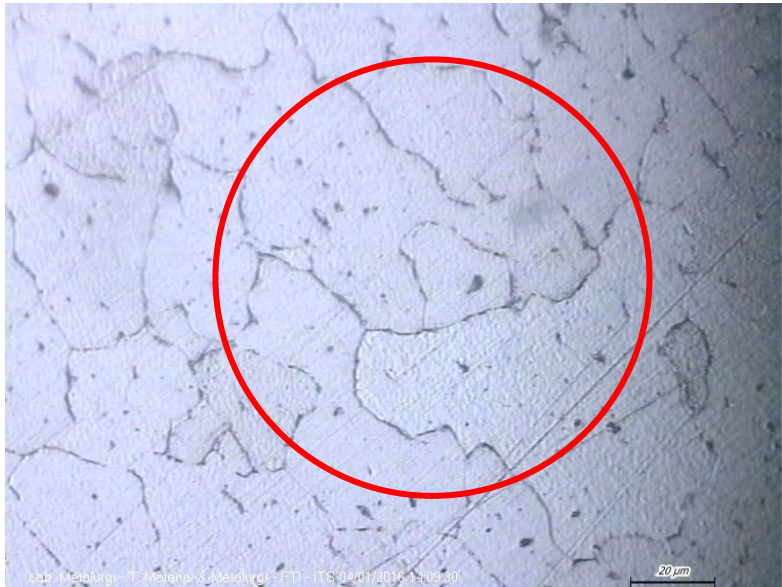


900.3' tepi perbesaran 1000x



900.3' *mapping* bagian tepi perbesaran 1000x

Lampiran 4 Perhitungan Grain size Sampel Tanpa perlakuan



Sampel Pre-heat 800°C waktu immerse 3 menit

N=13

Diameter = 20 mm

M=500 kali

Mencari keliling sebenarnya

$$K = \frac{\pi D}{M}$$

$$K = \frac{3.14 (20)}{500}$$

$$K = 0.126$$

Mencari N_L

$$Pl = \frac{N}{K}$$

$$Pl = \frac{13}{0.126}$$

$$Pl = 103.17$$

Mencari L_3

$$L = \frac{1}{Pl}$$

$$L = \frac{1}{103.17}$$

$$L = 0.0097$$

Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\log L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\log 0.0097) - 3.298\}$$

$$G = 10.08$$

$$Pl = \frac{8}{0.126}$$

$$Pl = 63.49$$

Mencari L_3

$$L = \frac{1}{Pl}$$

$$L = \frac{1}{63.49}$$

$$L = 0.0157$$

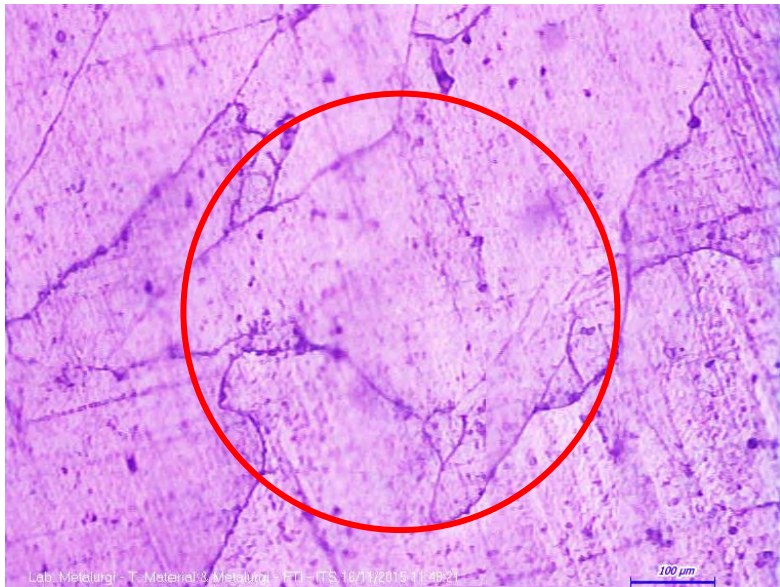
Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\log L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\log 0.0157) - 3.298\}$$

$$G = 8.69$$

Sampel Pre-heat 800°C waktu immerse 5 menit



N= 9

D=20 mm

M=500 kali

Mencari Keliling

$$K = \frac{\pi D}{M}$$

$$K = \frac{3.14(20)}{500}$$

$$K = 0.126$$

Mencari N_L

$$Pl = \frac{N}{K}$$

$$Pl = \frac{9}{0.126}$$

$$Pl = 71.43$$

Mencari L_3

$$L = \frac{1}{Pl}$$

$$L = \frac{1}{71.43}$$

$$L = 0.01399$$

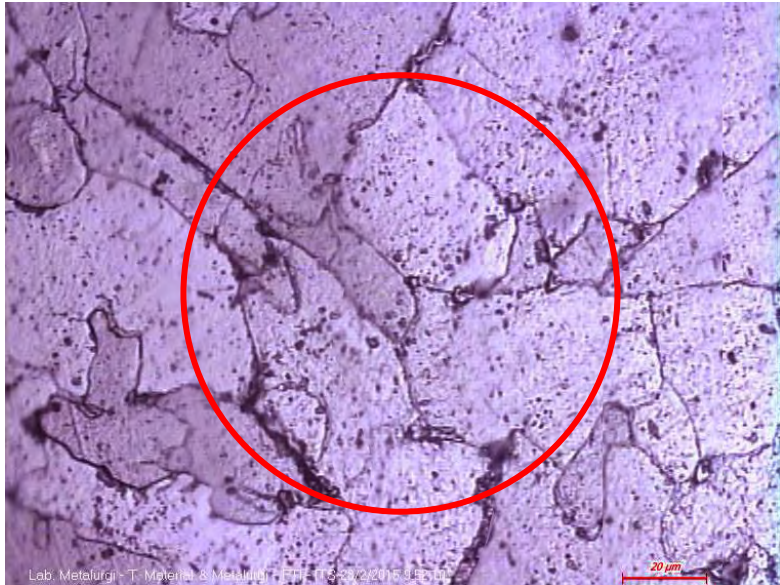
Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\text{Log } L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\text{Log } 0.01399) - 3.298\}$$

$$G = 9.02$$

Sampel Pre-heat 800°C waktu immerse 7 menit



N= 13

D=20 mm

M=500 kali

Mencari Keliling

$$K = \frac{\pi D}{M}$$

$$K = \frac{3.14(20)}{500}$$

$$K = 0.126$$

Mencari N_L

$$Pl = \frac{N}{K}$$

$$Pl = \frac{13}{0.126}$$

$$Pl = 103.17$$

Mencari L_3

$$L = \frac{1}{Pl}$$

$$L = \frac{1}{103.17}$$

$$L = 0.00967$$

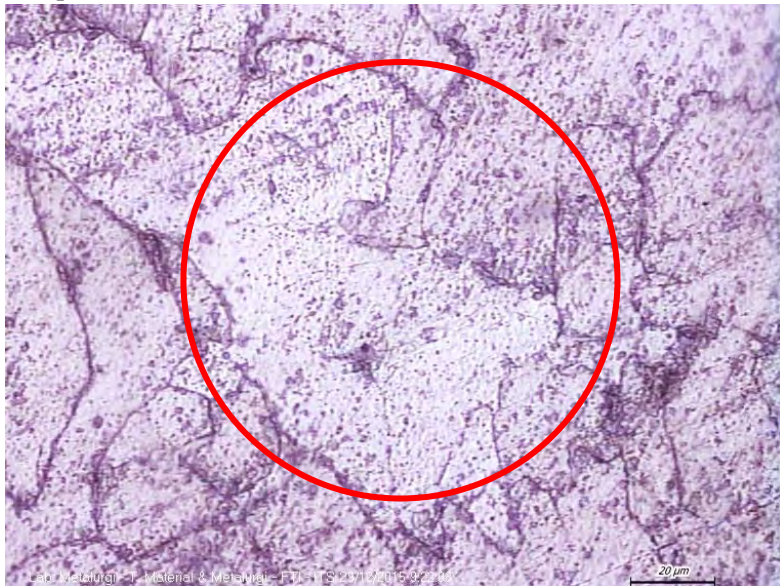
Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\log L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\log 0.00967) - 3.298\}$$

$$G = 10.09$$

Sampel Pre-heat 900°C waktu immerse 3 menit



N= 14

D=20 mm

M=500 kali

Mencari Keliling

$$K = \frac{\pi D}{M}$$

$$K = \frac{3.14(20)}{500}$$

$$K = 0.126$$

Mencari N_L

$$Pl = \frac{N}{K}$$

$$Pl = \frac{14}{0.126}$$

$$Pl = 103.17$$

Mencari L_3

$$L = \frac{1}{Pl}$$

$$L = \frac{1}{103.17}$$

$$L = 0.009$$

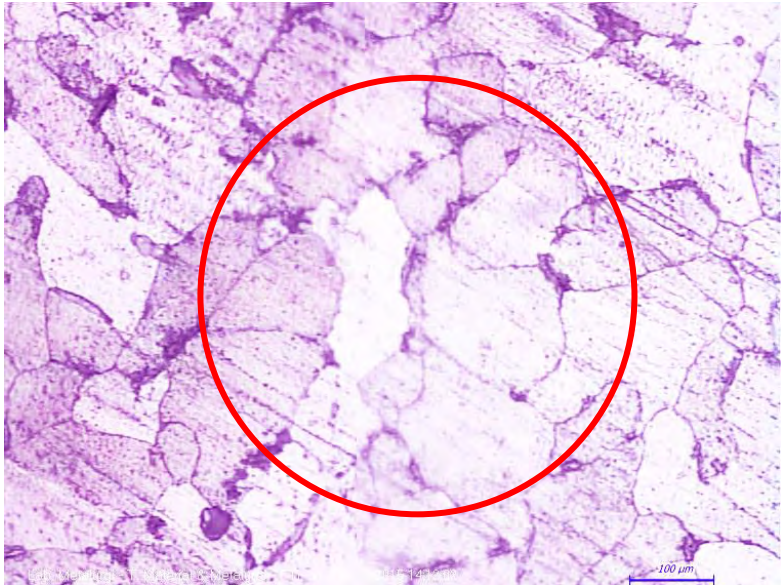
Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\log L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\log 0.009) - 3.298\}$$

$$G = 10.30$$

Sampel Pre-heat 900°C waktu immerse 5 menit



N=16

Diameter = 20 mm

M=500 kali

Mencari keliling sebenarnya

$$K = \frac{\pi D}{M}$$

$$K = \frac{3.14 (20)}{500}$$

$$K = 0.126$$

Mencari N_L

$$NL = \frac{N}{K}$$

$$NL = \frac{16}{0.126}$$

$$NL = 126.98$$

Mencari Pl

$$Pl = \frac{1}{NL}$$

$$Pl = \frac{1}{NL}$$

$$Pl = \frac{1}{126.98}$$

$$Pl = 0.00788$$

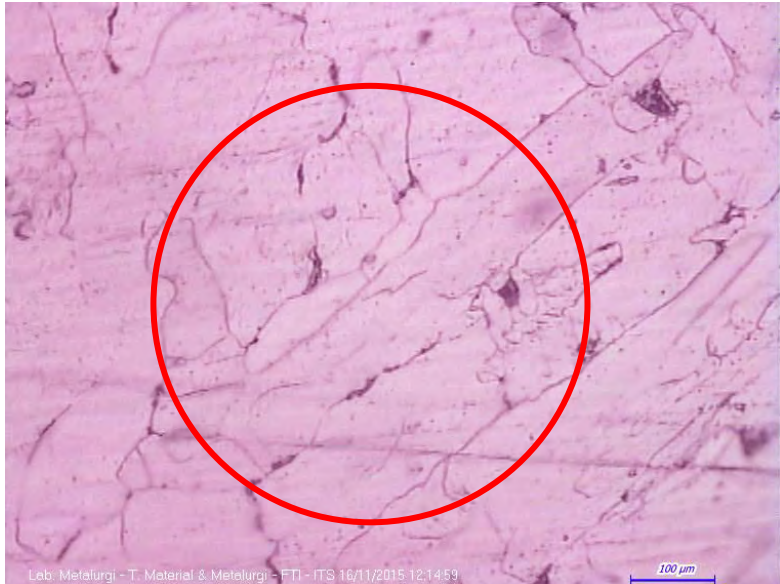
Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\log L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\log 0.00788) - 3.298\}$$

$$G = 10.7$$

Sampel Pre-heat 900°C waktu immerse 7 menit



N=18

Diameter = 20 mm

M=500 kali

Mencari keliling sebenarnya

$$K = \frac{\pi D}{M}$$

$$K = \frac{3.14 (20)}{500}$$

$$K = 0.126$$

Mencari N_L

$$Pl = \frac{N}{K}$$

$$Pl = \frac{18}{0.126}$$

$$Pl = 142.86$$

Mencari L_3

$$L = \frac{1}{Pl}$$

$$L = \frac{1}{142.86}$$

$$L = 0.009692$$

Mencari G (grain size)

$$G = \{-6.6457(\log L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457(\log 0.009699) - 3.298\}$$

$$G = 11.02$$

Lampiran 5 Potongan tabel grain size (ASTM E-112)

Grain Size No. G	N_u Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		N_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.69	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.9
13.5	5792.82	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Lampiran 6 Perhitungan Strain unit kristal

Sampel pre-heat 800°C

Sampel	θ	$B_m(\text{rad})$	$B_s(\text{rad})$	ε
TP	22.328	14.591×10^{-4}	15.009×10^{-4}	2.17
3'	22.297	21.363×10^{-4}		9.20
5'	22.295	40.876×10^{-4}		23.24
7'	22.244	52.552×10^{-4}		30.78

$$B = \sqrt{B_m^2 - B_s^2}$$

Dimana:

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$\varepsilon = \frac{B \cos \theta}{4 \sin \theta}$$

Mencari nilai B

- Sampel TP

$$B = \sqrt{(14.591 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{212.90 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 3.517 \times 10^{-4}$$

- Sampel 3'

$$B = \sqrt{(21.363 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{456.38 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 15.20 \times 10^{-4}$$

- Sampel 5'

$$B = \sqrt{(40.876 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{1670.85 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 38.02 \times 10^{-4}$$

- Sampel 7'

$$B = \sqrt{(52.552 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{2761.71 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 50.36 \times 10^{-4}$$

Mencari nilai microstrain (ε)

$$\varepsilon = \frac{B \cos \theta}{4 \sin \theta}$$

- Sampel TP

$$\varepsilon = \frac{3.517 \times 10^{-4} (0.3799)}{4 \times 0.9250}$$

$$\varepsilon = 2.17 \times 10^{-4}$$

- Sampel 3'

$$\varepsilon = \frac{15.20 \times 10^{-4} (0.379)}{4 \times 0.925}$$

$$\varepsilon = 9.20 \times 10^{-4}$$

- Sampel 5'

$$\varepsilon = \frac{38.02 \times 10^{-4} (0.379)}{4 \times 0.925}$$

$$\varepsilon = 23.24 \times 10^{-4}$$

- Sampel 7'

$$\varepsilon = \frac{50.36 \times 10^{-4} (0.379)}{4 \times 0.925}$$

$$\varepsilon = 30.78 \times 10^{-4}$$

Sampel pre-heat 900°C

Sampel	θ	B_m (rad)	B_s (rad)	ϵ
3'	22.446	17.523×10^{-4}	15.009×10^{-4}	5.47×10^{-4}
5'	22.329	40.876×10^{-4}		23.18×10^{-4}
7'	22.272	46.705×10^{-4}		25.07×10^{-4}

$$B = \sqrt{B_m^2 - B_s^2}$$

Dimana:

$$B = 4\epsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$\epsilon = \frac{B \cos \theta}{4 \sin \theta}$$

Mencari nilai B

- Sampel 3'

$$B = \sqrt{(17.523 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{307.06 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 9.04 \times 10^{-4}$$

- Sampel 5'

$$B = \sqrt{(40.876 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{1670.85 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 38.02 \times 10^{-4}$$

- Sampel 7'

$$B = \sqrt{(46.705 \times 10^{-4})^2 - (15.009 \times 10^{-4})^2}$$

$$B = \sqrt{2181.35 \times 10^{-8} - 225.27 \times 10^{-8}}$$

$$B = 44.22 \times 10^{-4}$$

Mencari nilai microstrain (ϵ)

$$\varepsilon = \frac{B \cos \theta}{4 \sin \theta}$$

- Sampel 3'

$$\varepsilon = \frac{9.04 \times 10^{-4} (0.3818)}{4 \times 0.9242}$$

$$\varepsilon = 5.47 \times 10^{-4}$$

- Sampel 5'

$$\varepsilon = \frac{38.02 \times 10^{-4} (0.3799)}{4 \times 0.9250}$$

$$\varepsilon = 23.18 \times 10^{-4}$$

- Sampel 7'

$$\varepsilon = \frac{44.22 \times 10^{-4} (0.3790)}{4 \times 0.9254}$$

$$\varepsilon = 25.0 \times 10^{-4}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Anon., 1990. *ASM Handbook Vol. 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. Ohio: ASM International
- Babich, A, Senk, H. W. Gudenau, dan Mavrommatis, 2008, "*Iron Making Textbook*", Aachen, RWTH Aachen University Department of Ferrous Metallurgy.
- Bird, R. Bryon, Warren Stewart, dan Edwin Lightfoot, 2002, "*Transport phenomena second edition*", New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Callister, William D., 2007, "*Materials Science and Engineering*", Utah, John Wiley & Sons, Inc.
- Coni, N, M.L. Gipiela, M. D'Oliveira, dan Marcondes, 2004, "*Study of the Mechanical Properties of the Hot Dip Galvanizing* galvanized steel and galvanum, Rio De Janero, J. Braz. Soc. Mech. Sci & Eng. Vol.31 no.4 ;ISSN 1678-5878.
- Digges, Thomas G. dan Samuel J. Rosenberg, 1966, "*Heat Treatment and Properties of Iron and Steel*", Washington D.C, National Bureau of Standards Monograph.
- Geiger, G. H. dan D. R. Poisier, 1973, "*Transport Phenomena in Metallurgy*", Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company.
- Hasa, M.Husna, 2007, "*Formasi Fasa dan Mikrostruktur Bahan Struktur paduan Aluminium Fero-Nikel Hasil Proses Sintesis*", Yogyakarta, Pustek Akselerator dan Proses Bahan-BATAN;ISSN 0216-3128.

Iguchi, Manabu, Olusegun, dan Ilegbusi, 2014, "*Basic Transport phenomena in Materials Engineering*", Tokyo, Springer.

Ishiguro, Yasuhide, Kauro Sato, dan Takashi Murayama, 2005, "*Precipitation of Copper Sulfide in Ultra low Carbon Steel Containing Residual Level of Copper*", Fukuyama, The Japan Institute of Metals Vol.64, No.4 (2005) pp.769 to 778.

Ruddle, G.E., 2002. *Effects of Residuals in Carbon Steels* Pennsylvania: American Iron and Steel Institute.

Surdia, Tata dan Shinroku Saito, 1999, "*Pengetahuan Bahan Teknik*", Jakarta, Pradnya Paramita.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Tio Zailindra yang dilahirkan di Cirebon pada tanggal 25 Februari 1994. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SDN 3 Klangenan, SMPN 1 Palimanan, dan SMAN 2 Cirebon. Penulis merupakan mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun masuk 2012.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi mahasiswa Badan Eksekutif Mahasiswa sebagai staff BIDANG Manajemen Bisnis Kementrian Perekonomian BEM ITS. Selain itu penulis juga aktif dalam aktifitas akademik sebagai asisten laboratorium Praktikum Metalurgi 1 dan asisten Praktikum Metalurgi 2 serta sebagai asisten dosen dalam mata kuliah Mekanika Teknik

Alamat penulis saat ini adalah Perumahan Griya Makmur B 05 RT/RW 001/001 Desa Palimanan Timur Kecamatan Palimanan Kabupaten Cirebon Provinsi Jawa Barat. Nomor telepon yang dapat dihubungi adalah 085316862306 atau alamat email zailindratio@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)